

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Technologie vysokoposuvového frézování austenitických  
ocelí

High Feed Milling Technology of Austenitic Steels

Student:

Jiří Krutilek

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Krutílek**  
Studijní program: **B2341 Strojírenství**  
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**  
Téma: **Technologie vysokoposuvového frézování austenitických ocelí**  
**High Feed Milling Technology of Austenitic Steels**  
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Řešení stávajícího stavu frézování austenitických ocelí.
2. Návrh experimentální činnosti frézování.
3. Provedení experimentálního testování.
4. Zhodnocení dat a diskuze výsledků.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.eleam.vsb.cz/archived/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [3] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.
- [4] STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1997. ISBN 0-8247-9579-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: **09.12.2016**

Datum odevzdání: **15.05.2017**

  
doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

## Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 12.5.2017 .....


Kučelka .....

podpis studenta

**Prohlašuji, že**

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домии, что Высшая школа́ ба́йская – Техни́ческая универси́тета Остра́ва (далее́ – „VŠB-TUO“) ма́ право́ невѣ́дѣ́лѣ́чнѣ́ к сво́йму́ внут́рннѣ́ потре́бѣ́ бакала́рскую́ рабо́ту испо́лнить (§ 35 одст. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было́ сже́днано́, что с VŠB-TUO, в слу́чае́ за́йма с её́ сто́роны, за́клучу́ лицен́нний с согла́сие́м испо́лнить рабо́ту в о́бла́сте § 12 одст. 4 ау́торского́ зако́на.
- было́ сже́днано́, что испо́лнить сво́ё со́здание – бакала́рскую́ рабо́ту или́ предоста́вить лицен́ию к её́му́ испо́лнению́ могу́ я́н с со́гласие́м VŠB-TUO, кото́рая́ я́н о́бла́стна́ в тако́м слу́чае́ о́бла́стна́ потре́бовать со́отве́тствующи́й в́клад на́ оплату́ ра́сходов, кото́рые́ бы́ли VŠB-TUO на́ со́здание́ со́зданий (до́ тех́ пор, ка́к фаќтически́ в́ыше́).
- беру на ве́домии, что о́бщественно́й сво́й рабо́ты со́гласую́ с о́бщественно́й сво́й рабо́ты по́сле зако́на ч. 111/1998 Sb., о́ высо́ких шко́лах и о́ изме́не́нии́ и до́полне́нии́ да́льших зако́нов (за́кон о́ высо́ких шко́лах), в со́дѣ́ржа́нии́ по́здѣ́йшихъ́ предпи́саний, без о́бща́ния на́ ре́зультатъ́ её́ о́бщественно́й.

V Ostravě: 12.5.2017



.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Jiří Krutilek

Adresa trvalého pobytu autora práce: Kopřivnice, Příčná 306/1

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KRUTILEK, J. *Technologie vysokoposuvového frézování austenitické oceli: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 71s. Vedoucí práce: doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petru, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá technologií vysokoposuvového frézování austenitické oceli. Teoretická část je věnována rešerši stávajícího stavu frézování austenitické oceli a návrhu experimentální činnosti frézování, kde jsou popsány vlastnosti austenitických ocelí, nástroje pro frézování, využití vysokoposuvového frézování a zpracované rešerše k podobným experimentům. V experimentální části je popsán obráběcí stroj, nástroj, řezné podmínky a použítá měřidla. Cílem práce je vyhodnotit složky řezných sil, výslednou sílu při frézování a parametry drsnosti povrchu. Z naměřených dat byly vyhodnoceny výsledky, které byly zpracovány do grafu a tabulek. V poslední části je uvedena diskuze výsledků, doporučení a závěry, kde jsou vyhodnoceny složky řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $F$  a parametry drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$ .

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KRUTILEK, J. *High Feed Milling Technology of Austenitic Steels: bachelor's thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2017, 71p. Thesis head: Assoc. Prof. Jana Petru, Ph.D., multi MSc., M.A.

The bachelor's thesis deals with the high feed milling of austenitic steels. The theoretical part is focused on the research of current state of austenitic steel milling and suggestion of experimental activity milling with the description of austenitic steels characters, tools for milling, usage of high feed milling and worked out researches to similar experiments. In the practical part there is description of the machine tool, cutting tool, cutting conditions and used measuring instrument. The aim of the thesis is evaluation of cutting forces data, final force during milling and surface roughness parameters. The results were evaluated from the measured data and were given into charts and graphs. In the last part there is discussion of the results, recommendation and conclusion, where cutting forces  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $F$  data and surface roughness parameters  $R_a$ ,  $R_z$  are evaluated.

## Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	3
Úvod .....	6
1 Rešerše stávajícího stavu frézování austenitických ocelí.....	7
1.1 Vlastnosti austenitických ocelí .....	7
1.1.1 Legující prvky austenitické oceli.....	7
1.2 Obrábění austenitických ocelí .....	8
1.3 Základní pravidla pro frézování austenitických ocelí .....	9
1.4 Nástroje k frézování austenitických ocelí.....	9
1.5 Popis oceli pro testování .....	10
1.6 Rešerše vysokoposuvového frézování austenitické oceli .....	11
1.7 Rešerše efektivního frézování korozivzdorné oceli.....	12
1.8 Rešerše vlivu řezného prostředí na integritu povrchu austenitické korozivzdorné oceli	13
1.9 Rešerše experimentální studie čelního frézování austenitické korozivzdorné oceli .....	15
1.10 Rešerše na integritu povrchu při suchém frézování austenitické oceli .....	15
1.11 Rešerše studie obrobitelnosti super austenitické korozivzdorné oceli .....	16
1.12 Rešerše drsnosti povrchu a vibrací při čelním frézování austenitické oceli.....	18
2 Návrh experimentální činnosti frézování.....	19
2.1 Vysokoposuvové frézování.....	19
2.2 Výhody a nevýhody vysokoposuvového frézování .....	19
2.3 Řezné materiály pro HFM .....	20
2.4 Nástroje pro HFM.....	21
2.5 Řezný proces pro HFM .....	22
2.6 Řezné síly.....	22
2.7 Čelní frézování.....	23
3 Provedení experimentálního testování.....	25
3.1 Popis experimentu .....	25
3.2 Obráběcí stroj.....	27
3.3 Obráběcí nástroj.....	28
3.3.1 Vyměnitelné břitové destičky .....	29
3.4 Řezné podmínky.....	29
3.4.1 Schéma navrženého experimentu .....	30
3.5 Použitá měřidla .....	31
3.5.1 Drsnoměr SURFEST SJ – 210.....	31
3.5.2 Dynamometr Kistler 9129 AA.....	32
4 Zhodnocení dat a diskuze výsledků.....	33

4.1	Řezné síly.....	33
4.1.1	Vyhodnocení a analýza řezných sil při frézování.....	33
4.1.2	Označení vyměnitelné břitové destičky .....	34
4.1.3	Měření složek $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 0,5$ [mm] .....	34
4.1.4	Měření složek $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 1$ [mm] .....	35
4.1.5	Měření složek $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 1,5$ [mm] .....	35
4.1.6	Měření složek $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 2$ [mm] .....	36
4.1.7	Maximálně naměřené hodnoty $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ .....	36
4.1.8	Zpracování hodnot silového zatížení.....	37
4.1.9	Závislost řezné síly na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 25, $a_p = 0,5$ mm .....	41
4.1.10	Závislost řezné síly na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 35, $a_p = 0,5$ mm .....	42
4.1.11	Závislost řezné síly na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 25, $a_p = 1$ mm .....	43
4.1.12	Závislost řezné síly na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 35, $a_p = 1$ mm .....	44
4.1.13	Porovnání složek řezných sil $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ a $F$ pro VBD SNGX 07 – 25 a SNGX 07 - 35 ....	45
4.1.14	Porovnání výsledné síly $F$ pro VBD SNGX 07 – 25 a SNGX 07 – 35.....	46
4.1.15	Zhodnocení výsledku řezných sil .....	46
4.2	Drsnost povrchu .....	47
4.2.1	Vyhodnocení drsnosti povrchu .....	47
4.2.2	Označení vyměnitelným břitových destiček .....	48
4.2.3	Postup výpočtu drsnosti povrchu .....	48
4.2.4	Závislost drsnosti povrchu na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 25, $a_p = 0,5$ mm .....	52
4.2.5	Závislost drsnosti povrchu na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 35, $a_p = 0,5$ mm .....	53
4.2.6	Závislost drsnosti povrchu na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 25, $a_p = 1$ mm ..	54
4.2.7	Závislost drsnosti povrchu na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 35, $a_p = 1$ mm ...	55
4.2.8	Porovnání parametru $R_a$ a $R_z$ pro VBD SNGX 07 – 25 a SNGX 07 – 35 .....	56
4.2.9	Zhodnocení výsledku drsnosti povrchu.....	57
4.3	Diskuze a doporučení .....	58
	Závěr.....	60
	Použitá literatura.....	61

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CAM	Computer Aided Manufacturing (počítačem podporovaná výroba)
CNC	Computer Numerical Control (číslicové řízení počítačem)
CVD	Chemical Vapour Deposition (nanášení povlaků chemickým způsobem)
ČSN	státní technika norma
D	průměr frézy [mm]
$D_2$	střední průměr frézy [mm]
DC	Dry Cutting (suché obrábění)
F	celková síla řezání [N]
$F_x = F_{fn}$	normálová síla [N]
$F_{cl}$	řezná složka [N]
$F_{cnl}$	kolmá řezná složka síly řezání [N]
$F_y = F_f$	posuvová síla [N]
$F_z = F_p$	pasivní síla [N]
H	výška dynamometru [mm]
HC	Hard Cutting (tvrdé obrábění)
HFC	High Feed Cutting (vysokoposuvové frézování)
HFM	High Feed Milling (vysokoposuvové obrábění)
HPM	High Performance Machining (vysokovýkonné obrábění)
HSC	High Speed Cutting (vysokorychlostní obrábění)
L	délka [mm]
M	krouticí moment [N.m]
NC	Numerical Control (číslicové řízení)
PVD	Physical Vapour Deposition (nanášení odpařením z pevné fáze)
Ra	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [ $\mu\text{m}$ ]
Rz	největší výška profilu [ $\mu\text{m}$ ]



SK	slinutý karbid [-]
SNGX	označení vyměnitelné břitové destičky
U	rozšířená nejistota [ $\mu\text{m}$ ]
$U_C$	rozšířená kombinovaná nejistota [ $\mu\text{m}$ ]
VBD	vyměnitelné břitové destičky
$a_p$	hloubka řezu [mm]
$a_e$	šířka záběru [mm]
f	posuv [mm]
$f_z$	posuv na zub [mm]
k	součinitel rozdělení [-]
$k_U$	koeficient rozšíření [-]
n	otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]
$n_i$	počet měření [-]
$s_F$	výběrová směrodatná odchylka [N]
$s_x$	výběrová směrodatná odchylka [ $\mu\text{m}$ ]
$u_A$	standartní nejistota typu A [ $\mu\text{m}$ ]
$u_B$	standartní nejistota typu B [ $\mu\text{m}$ ]
$u_{B1}$	nejistota vlivu opěrné patky snímacího hrotu [ $\mu\text{m}$ ]
$u_{B2}$	nejistota měřicího přístroje [ $\mu\text{m}$ ]
$u_C$	kombinovaná standartní nejistota [ $\mu\text{m}$ ]
$v_c$	řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]
$v_f$	rychlost posuvu [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]
w	šířka dynamometru [mm]
$x_i$	naměřené veličiny [-]
z	počet zubů [-]
$\alpha$	úhel hřbetu [ $^\circ$ ]
$\beta$	úhel břitu [ $^\circ$ ]

$\kappa_r$	úhel nastavení hlavního ostří [°]
$\varphi$	úhel pootočení frézy [°]

## Úvod

V bakalářské práci bude řešena technologie vysokoposuvového frézování austenitické oceli 1.4404 (X2CrNiMo17–12-2) dle ČSN 17349.4. Třískové obrábění austenitických ocelí, vzhledem k jejich vlastnostem patří mezi problémové materiály, u kterých se musí stanovit vhodné řezné podmínky. Vysokoposuvové frézování je vysoce produktivní metodou obrábění. Je charakterizováno velkým posuvem na zub s malou hloubkou řezu, které vedou ke snížení strojních časů a snižování výrobních nákladů.

V teoretické části bakalářské práce je provedena analýza stávajícího stavu frézování austenitických ocelí, popis zvolené austenitické oceli pro testování, vlastnosti austenitických ocelí a vysokoposuvové frézování.

Během experimentu byla frézována austenitická ocel 1.4404 za předem stanovených řezných podmínek. Při pokusu byla zvolena konstantní řezná rychlost a šířka záběru. Proměnlivé parametry byly: posuv na zub, rychlost posuvu a hloubka řezu. Experimentální část se prováděla na frézovacím centru DMG MORI DMU 50. Složky řezných sil byly měřeny pomocí dynamometru Kistler 9129AA, který byl připojený k zesilovacímu zařízení Kistler Type 5070. Drsnost povrchu byla měřena drsnoměrem SURFEST SJ – 210. Celý experiment se prováděl v laboratoři VŠB - TUO, Fakultě strojní, Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie.

Cílem experimentální části je stanovit složky řezné síly, výslednou sílu při frézování a parametry drsnosti povrchu v závislosti na posuvu na zub a hloubce řezu, pro dvě vyměnitelné břitové destičky. Pro každou destičku budou zpracovány a vyhodnoceny řezné síly a drsnost povrchu a následně porovnány mezi sebou. Z naměřených a vyhodnocených dat budou vytvořeny grafy, závěry a provedena diskuze a doporučení.

# 1 Rešerše stávajícího stavu frézování austenitických ocelí

## 1.1 Vlastnosti austenitických ocelí

Austenitické oceli jsou hlavní skupinou korozivzdorných ocelí. Obsahují méně než 0,10 % C, 16 – 22 % Cr, 8 – 40 % Ni. Typickým chemickým složením je 18 % Cr a 8 % Ni (jsou označovány 18/8 nebo typ 304). Oceli s vyšší odolností proti korozi jsou tvořeny přidáním molybdenu (2 – 3 %) a tyto oceli jsou označovány jako typ 316, které většinou nazýváme kyselinovzdorné oceli. Jsou nemagnetické, ale zbytkový ferit způsobuje slabý magnetismus. [1]

Austenitické oceli jsou dobře houževnaté, tvárné, mají vyšší tažnost a vrubovou houževnatost, a to i při velmi nízkých teplotách. Mají nízkou mez kluzu, ale vysokou pevnost, která se využívá při tváření za studena, protože ocel zpevňují. Tyto vlastnosti zajišťují dostatečný obsah austenitických prvků (Ni, Mn, C a N). [2]

Základní využití má v potravinářském, chemickém, energetickém a farmaceutickém průmyslu nebo jako chirurgická ocel. Pro součásti, které potřebují dobrou odolnost proti korozi, vyšší svařitelnost, skvělé vlastnosti za zvýšených teplot. Dále je možno uvedené oceli využít pro výrobu kuchyňských potřeb, ale také nacházejí využití v architektuře a stavebnictví. [3]

### 1.1.1 Legující prvky austenitické oceli

**Chrom** – je základní přísadou austenitických ocelí. Charakterizuje se vysokou odolností proti oxidaci. Čím více chromu ocel obsahuje, tím větší korozní odolnost má v oxidačním prostředí. U korozivzdorné oceli se obsah chromu pohybuje v rozmezí 15 – 30 %.

**Nikl** – je austenitotvorný prvek, který stabilizuje austenit. Je druhou základní přísadou austenitické oceli. Při obsahu cca 30 % niklu ve struktuře dochází k potlačení korozního praskání.

**Mangan** – je austenitotvorný prvek, který má malou difuzní rychlost. Nejčastěji se používá do obsahu 2%.

**Křemík** – silně feritický prvek, který je vysoce rozpustný v železe alfa. Zvyšuje odolnost proti korozi ve vroucí kyselině dusičné. V austenitických ocelích je v množství 3 – 4 %.

**Molybden** – feritotvorný prvek. Zvyšuje odolnost proti korozi, žárupevnost a žáruvzdornost ve všech prostředích. Obsah molybdenu v austenitických ocelích je od 0 do 5 %.

**Dusík** – silně austenitotvorný prvek. Zvyšuje pevnost v tahu a kluzu a má vysokou odolnost proti bodové a štěrbinové korozi. V ocelích má obsah až 0,4 %.

**Měď** – slabý austenitotvorný prvek, který podporuje účinky molybdenu.

**Titan** – karbido tvorný prvek, který snižuje obsah uhlíku v oceli. [24]

## 1.2 Obrábění austenitických ocelí

Třískové obrábění austenitických ocelí, vzhledem k jejich vlastnostem patří mezi problémové materiály, u kterých se musí stanovit vhodné řezné podmínky a zvolit vhodný řezný nástroj. Řezný nástroj musí být houževnatý a zvolený povlak na nástroji by měl mít nižší tendenci k adhezi. Problém při obrábění vzniká hlavně díky nízké tepelné vodivosti austenitické oceli. Třískami je odváděno menší teplo, proto se více tepla odvádí do řezné hrany, a to vede k plastické deformaci nástroje. Řeznou rychlost a posuv je nutno zvolit tak, aby co nejvíce tepla bylo odváděno třískami. [4], [5]

Problém při obrábění přináší zejména rychlé opotřebení břitu, problematický odchod třísky z místa řezu a lámání třísek. Na břitu nástroje se vytváří nárůstky a břit je narušen chemickou difuzí, které výrazně snižují kvalitu povrchu. K opotřebení nástroje nedochází pouze z důvodu poškození, ale i vylamování řezné hrany nebo praskání. Austenitické oceli mají vyšší sklon k deformačnímu zpevnění, proto řezný nástroj musí mít správnou geometrii řezné hrany. Ostřejší řezné hrany sníží deformační zpevnění během řezného procesu. Hloubka řezu se musí často měnit, tím bude sníženo riziko vzniku vrubového opotřebení na ostří nástroje. Nevýhodou je, že oceli jsou vysoce abrazivní a kladou výjimečné nároky na povlak. Řezný nástroj by měl být vysoce otěruvzdorný. Pro obrábění je velmi důležité maximalizovat využití nástroje, zvýšit objem odebraného materiálu po dobu životnosti nástroje, protože abrazivnost způsobuje rychlý vznik výmolu. [4], [5]



*Obr. 1 Vytvoření nárůstku na ostří nástroje [6]*

### 1.3 Základní pravidla pro frézování austenitických ocelí

Volí se silné břitové destičky s ostrou geometrií, které mají velký úhel čela se zesíleným břitem. T – fazetka musí být pozitivní, aby byly minimalizovány řezné síly. Používají se houževnaté materiály karbidové třídy pro hrubování, pro dokončení se využívají tvrdé karbidové třídy. Pravidelně se otáčí a vyměňuje VBD, aby se zamezilo opotřebení. [8]

Dalším důležitým faktorem při frézování je správná volba řezných podmínek, která zásadně ovlivňuje optimální řezný proces a životnost nástroje. Volí se co největší hloubka řezu ( $a_p$ ) a posuv ( $f$ ). Čím menší se použije  $a_p$ , tím větší se zvolí řezná rychlost ( $v_c$ ). Pro dodržení správné teploty řezu. Důležité je, aby odvedené teplo přestupovalo do třísky, ne do nástroje. Hloubka řezu musí být alespoň 1 [mm]. Pokud není nutný, vynechává se dokončovací řez. Během volby optimálních řezných podmínek je nutno uvažovat i o strategii frézování, zda bude použito vysokoposuvové, vysokorychlostní nebo ponorné frézování. Velmi důležitým faktorem je lehký řez, který musí vést pod tvrdou povrchovou vrstvou a toho se dosáhne použitím sousledného frézování. Použitím procesního média do místa řezu se omezí vznik tepla. Začnou se utvářet silné třísky, které svým objemem zajistí dostatečný odvod tepla. Vysokorychlostní metodou bez přívodu procesního média je možno frézovat všechny typy austenitických ocelí. Výjimkou jsou PH oceli, u kterých se musí zvolit vhodné procesní médium, pro správný odvod třísky. [7]

### 1.4 Nástroje k frézování austenitických ocelí

Mezi moderní nástroje pro frézování austenitických ocelí náleží nástroje s odpovídající geometrií břitu a karbidovou třídou. Volí se nejčastěji kruhové břitové destičky ze slinutých karbidů. Používají se VBD, které jsou nepovlakované ze SK. Obsahující převážně karbid wolframu, který tvoří 79 až 84 % složení slinutého karbidu. Také se dají využít cermety, což jsou nepovlakované SK vyrobeny s obsahem

karbidu titanu, nitridu titanu nebo obsahují společně tyto dva karbidy. Obsah karbidu v cermetech je asi 60 až 85 %. Ve velké míře se využívají SK s povlakem pro snížení adhezivních účinků.

Nepovlakované SK jsou zejména pro hrubování, a to při nízkých nebo středních řezných rychlostech. Cermetová třída se využívá hlavně pro frézování bez přívodu procesního média. Cermety mají vysokou odolnost proti plastické deformaci, tvorbě nárůstků na břitu a ulpívání materiálu. Tím tvoří vhodnou třídu pro široký rozsah řezných rychlostí. Nejčastější využívání je pro hladící VBD. Povlakovaná karbidová třída je pro frézování ocelí, které vyžadují houževnatost řezného materiálu. Využívá se pro obrábění s procesním médiem i bez procesního média. [8], [9]



*Obr. 2 Kruhová VBD typ GC2030 [10]*

### **1.5 Popis oceli pro testování**

Pro experimentální část byla vybrána austenitická ocel 1.4404 (X2CrNiMo17–12–2) dle ČSN 17349.4. Jedná se o chrom niklovou, austenitickou nestabilizovanou molybdenovou nízkouhlíkovou korozivzdornou ocel. Jinak nazývaná kyselinovzdorná ocel. Vyznačuje se vysokou odolností proti korozi v průmyslovém prostředí. Je zvláště odolná proti kyselinám, výjimkou kyseliny dusičné a jejich výparů. Má vysoký sklon ke zpevnění za studena. V oblastech tepelného ovlivnění není náchylná na mezikrystalovou korozi. Je dobře třískově obrobitelná a výborně svařitelná. Při dokončovací operaci leštění, lze dosáhnout vynikajícího zrcadlového lesku. Ocel se využívá pro stavbu chemických reaktorů, tlakových nádob a zásobníků. Je vhodná pro neoxidační prostředí, které obsahuje silně organické a anorganické kyseliny nízkých koncentrací. Aplikuje se v prostředí bazénů, pro styk s potravinami, ale nepoužívá se pro pitnou vodu, kvůli většímu obsahu Ni. Dále je součástí průmyslových přístrojů a strojů, boxů, krytů, plechů pro CNC výrobu a pro svařování konstrukcí v agresivním prostředí. [25]

*Tabulka 1 Mechanické vlastnosti austenitické oceli 1.4404 [25]*

<b>Mechanické vlastnosti oceli</b>	<b>Mez kluzu [N.mm<sup>-2</sup>]</b>	<b>Pevnost v tahu [N.mm<sup>-2</sup>]</b>	<b>Tažnosti [%]</b>	<b>Žihací teplota [°C]</b>
1.4404	220	520 - 680	40	1000 – 1100

*Tabulka 2 Chemické složení austenitické oceli 1.4404 [25]*

<b>Obsah prvků oceli</b>	<b>Cr [%]</b>	<b>Ni [%]</b>	<b>Mo [%]</b>	<b>Mn [%]</b>	<b>Si [%]</b>	<b>C [%]</b>
1.4404	16,5 - 18,5	11 - 14	2 – 2,5	2	1	0,03

## 1.6 Rešerše vysokoposuvového frézování austenitické oceli

Problematikou vysokoposuvového frézování se zabývali pracovníci VŠB – TUO na Fakultě strojní, Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologii. Byla zde zpracovaná bakalářská práce na téma vysokoposuvového frézování oceli. Experiment se prováděl na Žilinské univerzitě na Katedře obrábění a výrobní techniky. [27]

Experimentální metodika se věnuje popisu experimentu, kde je popsán stroj, nástroj, upnutí, vyměnitelné břitové destičky, obráběný materiál, řezné podmínky a použité měřidla. Pro frézování bylo využito univerzální 3 – osé CNC frézovací centrum Hurco VMX 30t. Jako nástroj byla zvolena šesti břitá fréza s VBD. Označení frézy R220.21 – 0035 – LP06. Označení VBD LPHT060310 TR – ME05 od firmy Seco Tools cz s. r. o. Obráběný materiál byla korozivzdorná ocel 1.4301 (X5CrNi 18 – 10) podle ČSN 17240, která byla zakoupena ve společnosti Akros s. r. o. [27]

Experiment se zabýval čelním frézováním. Měněny byly parametry řezné rychlosti ( $v_c$ ) a posuv na zub ( $f_z$ ), při konstantní hloubce řezu ( $a_p$ ), šířce záběrů ( $a_e$ ) a počtu zubů ( $z$ ). Výsledkem bylo hodnocení drsnosti povrchu, základních parametrů  $R_a$ ,  $R_z$  a řezných sil v osách  $F_{fn}$ ,  $F_f$  a  $F_p$ . [27]



Dosažené výsledky a vyhodnocené závěry: [27]

- Drsnost měřená kolmo na posuv se při zvyšování řezného posuvu ( $v_f$ ) a posuvu na zub ( $f_z$ ) se parametry  $R_a$  a  $R_z$  zvyšovaly.
- Drsnost měřena ve směru posuvu se při zvyšování  $v_f$  a  $f_z$  se parametry drsnosti  $R_a$  a  $R_z$  snižovaly.
- Optimální složky  $F_{fn}$ ,  $F_f$  a  $F_p$  byly při  $f_z = 0,3$  [mm],  $v_c = 550$  [m.mm<sup>-1</sup>] a  $v_f = 9$  [m.mm<sup>-1</sup>].

Více informací v dané literatuře. [27]

Obráběný materiál	Řezná rychlost: $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Posuv na zub: $f_z$ [mm]	Otáčky: $n$ [min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu: $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]
Ocel 1.4301 (X5CrNi18-10) ČSN 17 240	100	0,3	909	1,6
		0,4		2,2
		0,5		2,7
		0,7		3,8
	250	0,3	2273	4,1
		0,4		5,5
		0,5		6,8
		0,7		9,5
	350	0,3	3183	5,7
		0,4		7,6
		0,5		9,5
		0,7		13,4
	550	0,3	5002	9,0
		0,4		12,0
		0,5		15,0
		0,7		21,0

Obr. 3 Řezné podmínky použité v experimentu rešerše [27]

### 1.7 Rešerše efektivního frézování korozivzdorné oceli

Součástí bakalářské práce je zabývání se stávajícím stavem frézování austenitických ocelí. Na Vysokém učení technickém v Brně, byla zhotovena diplomová práce na efektivní frézování korozivzdorných ocelí 1.4301 (X5CrNi 18-10) dle ČSN 17240.4

a 1.4404 (X2CrNiMo 17-12-2) dle ČSN 17349.4. Pro firmu Pramet Tools s. r. o., která patří mezi tradiční české výrobce nástrojů pro třískové obrábění.

Experiment se zabýval měřením trvanlivosti nástroje, drsnosti povrchu, utváření třísky, silovým zatížením a efektivnosti. Experiment byl prováděn na dvou obráběcích strojích, kdy všechny zkoušky, až na měření řezných sil byly provedeny ve firmě Pramet Tools s. r. o. na frézovacím CNC centru MCV 1270 Power od KOVOSVITU MAS. Další měření probíhalo na Vysokém učení technickém v Brně, kde se využila frézka FV25CNC. Nástroje se používaly od firem Pramet, Mitsubishi, Iscar viz Obr. 4 a porovnávaly se mezi sebou. Z vyhodnocených dat se vybraly pouze parametry drsností povrchu, které byly zpracovány pro materiál 1.4404 (X2CrNiMo 17-12-2) dle ČSN 17349.4. Dosažené výsledky porovnávání viz literatura [28]. Řezné podmínky byly zvoleny na základě doporučení výrobců viz Obr. 4.

Výsledek experimentu drsnosti povrchu byl takový, že za konstantních řezných podmínek byly značně rozdílné výsledky. Nejlepší hodnoty parametrů drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$  byly při  $f_z = 0,15$  mm. Hodnota  $R_a$  se při tomto posuvu na zub pohybovala v rozmezí od  $0,86 \mu\text{m}$  do  $2,62 \mu\text{m}$ . [28]

Výrobce	označení	materiál	řezná rychlost [m/min]	max. hloubka řezu $a_p$ [mm]	rozsah posuvu na zub $f_z$ [mm]
MITSUBISHI	OEMX12T3ESR1	F7030	150–300	2,5	0,05 – 0,20
	OEMX12T3ETR1-JS	F620	150–300	2,5	0,05 – 0,20
	OEMX12T3EER1-JS	F7010	150–250	2,5	0,05 – 0,20
PRAMET	OEHT0604AESR-MM-P01	M9340	110–260	4	0,08 – 0,25
	OEHT0604AESR-MM-P02	M9340	110–260	4	0,08 – 0,25
	OEHT0604AESR-MM-P03	M9340	110–260	4	0,08 – 0,25
	OEHT0604AESR-MM-P04	M9340	110–260	4	0,08 – 0,25
	OEHT0604AESR-MM-P01	8240	110–180	4	0,08 – 0,25
	OEHT0604AESR-MM-P02	8240	110–180	4	0,08 – 0,25
	OEHT0604AESR-MM-P03	8240	110–180	4	0,08 – 0,25
	OEHT0604AESR-MM-P04	8240	110–180	4	0,08 – 0,25
ISCAR	OEMT 060405AER-76	IC4050	80–220	2,5	0,12 – 0,20

*Obr. 4 Vybrané nástroje a řezné podmínky [28]*

## 1.8 Řešení vlivu řezného prostředí na integritu povrchu austenitické korozivzdorné oceli

Tento experiment byl zpracovaný na Vysoké škole Strathclyde v Glasgowě na Katedře mechanického a leteckého inženýrství. Článek se zabývá vlivem řezných prostředí na integritě povrchu a spotřebě energie. Sepsali jej autoři

P. Muñoz – Escalona, A. Shokrani, S. T. Newman, pro časopis Robotika a Počítačem integrovaná výroba.

Článek popisuje čelní frézování austenitické oceli, při suchém obrábění, chlazení vodou a chlazení kapalným dusíkem. Významem tohoto experimentu je snížení spotřeby energie a dosažení optimální drsnosti povrchu, při kombinaci optimálních řezných podmínek. Z článku byla vybrána drsnost povrchu při čelním frézování bez chlazení. Více informací o snížení spotřeby energie v literatuře. [30]

Experimentální část publikace se věnuje popisu materiálu, nástroje, obráběcího stroje a zvolených řezných podmínek. Materiálem je korozivzdorná žíhaná ocel 1.4305 (X8CrNiS 18 – 9) dle ČSN 17243. Jako nástroj byla zvolena 3 břitá fréza o průměru 14 mm s označením Guhring GTN 03872. Řezné podmínky viz Obr. 5. Všechny pokusy byly provedeny na vertikálním obráběcím centru Siemens 846D Bridgeport 610XP2.[30]

Pokus	Prostředí	$v_c$ [m/min]	$f$ [mm/min]	$f_z$ [mm]	$a_p$ [mm]	$a_e$ [mm]
1		105	480	0,067	3	11
2		157	717,6	0,067	3	11
3	suché	157	535,5	0,05	3	11
4		157	364	0,0335	3	11
5		105	480	0,067	3	11
6		157	717,6	0,067	3	11
7	chlazení vodou	157	535,5	0,05	3	11
8		157	364	0,0335	3	11
9		105	480	0,067	3	11
10		157	717,6	0,067	3	11
11	kapalným dusíkem	157	535,5	0,05	3	11
12		157	364	0,0335	3	11

Obr. 5 Řezné podmínky vlivu řezného prostředí na integritu povrchu austenitické korozivzdorné oceli [30]

Dosažené výsledky jsou na Obr. 6. Vyvozené výsledky a vyhodnocené závěry pro suché frézování:

- Zvyšováním řezné rychlosti se snižovala drsnost povrchu.
- Snižováním posuvu na zub se snižovala drsnost povrchu.
- Při obrábění oceli 1.4305 je optimální z hlediska drsnosti povrchu použít suché obrábění.
- Optimální kombinace řezných parametrů je řezná rychlost  $v_c = 157 \text{ m.mm}^{-1}$  a rychlost posuvu  $v_f = 0,050 \text{ mm.min}^{-1}$ . [30]

Pokus	Prostředí	$v_c$ [m/min]	$f_z$ [mm]	$a_p$ [mm]	$a_e$ [mm]	Ra [ $\mu$ m]
1		105	0,067	3	11	1,29
2		157	0,067	3	11	0,945
3	suché	157	0,05	3	11	0,841
4		157	0,0335	3	11	0,71
5		105	0,067	3	11	1,234
6		157	0,067	3	11	-
7	chlazení vodou	157	0,05	3	11	0,871
8		157	0,0335	3	11	0,759
9		105	0,067	3	11	1,18
10		157	0,067	3	11	1,229
11	kapalným dusíkem	157	0,05	3	11	0,974
12		157	0,0335	3	11	0,932

*Obr. 6 Dosažené výsledky vlivu řezného prostředí na integritu povrchu austenitické korozivzdorné oceli [30]*

### 1.9 Rešerše experimentální studie čelního frézování austenitické korozivzdorné oceli

Experiment byl proveden v centru Pokročilých tryskových strojírenských technologií na strojírenské vysoké škole Shandong v Číně. Publikace se věnuje vlastnostem austenitické korozivzdorné oceli se složením 1Cr18Ni9Ti.

Cílem práce je snižování drsnosti povrchu a snižování řezných sil při čelním frézování. Dále se zabývá vlivy řezné rychlosti na životnost nástroje a mechanismu opotřebení nástroje. [31]

Po provedení pokusu byly zjištěny tyto výsledky:

- Řezná rychlost a posuv velmi ovlivňuje drsnost povrchu a řezné síly při obrábění.
- Nejlepší řezné podmínky pro drsnost povrchu a řezné síly jsou  $v_c = 200$  [m.min<sup>-1</sup>],  $f_z = 0,1$  [mm],  $a_p = 0,9$  [mm],  $a_e = 35$  [mm]. [31]

### 1.10 Rešerše na integritu povrchu při suchém frézování austenitické oceli

Tento experiment byl řešen v moderním výrobním parku na vysoké škole v Sheffieldu, Rotherham ve Spojeném království. Byl přednášen na konferenci v Nottinghamu v roce 2014. Hlavním cílem práce je vytvořit předběžný model, který předpovídá integritu povrchu s různými řeznými podmínkami. [32]

V experimentální části byly obráběny vzorky oceli 1.4306 (X2CrNi19-11) dle ČSN 17 249. Byly řezány plazmou na pásy o rozměru 100 x 100 x 20 mm. Obráběcí proces se skládal z několika průchodů v závislosti na zvolených parametrech. Během experimentu se měřilo zbytkové napětí pomocí přístrojů PROTO iXRD Combo a EBSD FEI Sirionu FEG – SEM. Bylo provedeno 10 pokusů, u kterých se měnily

řezné parametry ( $v_c$ ,  $f_z$ ,  $a_p$ ) více na Obr. 7. Testy byly provedeny na 3 osém vertikálním frézovacím centru MAZAK Smart 430A. Zvoleným nástrojem byla frézovací hlava Sandvik CoroMill R300 o průměru 53 mm s VBD od CoroMill R300 – 1240 o průměru 12 mm. Výsledky byly vyhodnoceny pomocí optického mikroskopu Alicona Infinity Focus. [32]

V pokusu byly vyhodnoceny tyto závěry:

- Řezná rychlost ( $v_c$ ) měla největší vliv na  $R_a$ .
- Nízký posuv na zub ( $f_z$ ) měl negativní vliv na  $R_a$ .
- Vysoké hloubky řezu ( $a_p$ ) a posuvy na zub ( $f_z$ ) vytvářely vyšší namáhání.
- Snižování posuvu na zub ( $f_z$ ) a řezné rychlosti ( $v_c$ ) a zvýšení hloubky řezu ( $a_p$ ) mělo nežádoucí vliv na nárůst zbytkových napětí a drsnost povrchu.
- S rostoucí řeznou rychlostí ( $v_c$ ) klesá zbytkové napětí.

Více informací viz literatura. [32]

<b>Pokusy</b>	<b><math>v_c</math> [m/min]</b>	<b><math>a_p</math> [mm]</b>	<b><math>f_z</math> [mm]</b>
<b>1</b>	200	2,5	0,07
<b>2</b>	40	4,5	0,07
<b>3</b>	200	4,5	0,25
<b>4</b>	120	3,5	0,16
<b>5</b>	40	2,5	0,25
<b>6</b>	120	3,5	0,16
<b>7</b>	200	2	0,25
<b>8</b>	300	2	0,35
<b>9</b>	150	2,6	0,15
<b>10</b>	200	2,5	0,07

*Obr. 7 Řezné podmínky suchého frézování [32]*

### 1.11 Rešerše studie obrobiteľnosti super austenitické korozivzdorné oceli

Tento projekt byl zhotovený na vysoké škole v Deakinu, Waurm Pounds v Austrálii. Byl publikován na mezinárodním strojírenském kongresu a expozici v Houstonu ve Spojených státech Amerických. Studie zkoumá obrobiteľnosť super austenitické oceli. Zaměřovala se na vyhodnocení mikrotvrdosti, řezných sil a drsnosti povrchu,

získané při kombinaci různých řezných podmínek. Řezné podmínky jsou uvedeny na Obr. 8. [33]

Experimentální zkouška zahrnuje frézování austenitické oceli 1.4529 (X1NiCrMoCuN 25 – 20 – 7) v publikaci je označovaná jako AL – 6XN. Jako obráběcí stroj bylo použito 5 – osé obráběcí centrum SPINNER U620 s řídicím systémem Sinumerik 840D CNC. Nástroj byl od výrobce ISCAR. Byla zvolena fréza H490 ERO AZ D16 – 2 W16 – 09 s dvěma VBD s označením H490 ANCX. Všechny zkoušky byly chlazeny procesní kapalinou Fenol – 2,8 %, která se míchala s vodou v poměru 1:10. Na měření řezných sil se použil dynamometr Kistler 9257b. Analýza řezných sil se prováděla pomocí přerušovaného řezu. Síly byly měřeny v osách x, y a z. [33]

Po měření a vyhodnocení naměřených dat byly vyvozeny následující výsledky:

- Zvyšování řezné rychlosti ( $v_c$ ) se snižují řezné síly.
- Zvyšováním posuvu na zub ( $f_z$ ) rostou řezné síly.
- Zvyšováním hloubky řezu ( $a_p$ ) rostou řezné síly.
- Zvýšení posuvu na zub ( $f_z$ ) a snížení hloubky řezu ( $a_p$ ) při konstantní řezné rychlosti ( $v_c$ ), má na řezné síly zanedbatelný vliv.
- Zvyšováním řezné rychlosti ( $v_c$ ) se snižuje drsnost povrchu.
- Zvyšováním posuvu na zub ( $f_z$ ) roste drsnost povrchu.
- Zvyšováním hloubky řezu ( $a_p$ ) roste drsnost povrchu.

Pro vyhodnocení tvrdosti a více informací viz literatura. [33]

<b>Pokus</b>	<b>Řezná rychlost [m/min]</b>	<b>Posuv na zub [mm]</b>	<b>Hloubka řezu [mm]</b>
1	100	0,1	2
2	100	0,1	3
3	100	0,15	2
4	100	0,15	3
5	100	0,1	2
6	150	0,1	3
7	150	0,15	2
8	150	0,15	3

*Obr. 8 Řezné podmínky frézování super austenitické korozivzdorné oceli [33]*

### **1.12 Rešerše drsnosti povrchu a vibrací při čelním frézování austenitické oceli**

Tento článek byl publikován ve vědeckém časopise Tiencin sponzorovaný vysokou školou Tiencin v roce 2011. Publikace zkoumala vibrace na radiální hloubce řezu, tvoření třísek a drsnost povrchu při čelním frézování. Jako materiál byla zvolena austenitická ocel 1.4301 (X5CrNi 18 – 10) dle ČSN 17240. [34]

Experiment byl prováděn až do radiální hloubky 80 mm. Během pokusu se měřily vibrace v různých frekvenčních oblastech. Vytvořily se tři typy třísek: tříska tvaru C, dlouhá tříska a spirálová tříska. Minimální hodnota drsnosti povrchu byla při radiální hloubce řezu 40 mm. V experimentu docházelo k nepravidelným změnám tvaru a tloušťek třísek. Bylo to způsobeno různými posuvy a řeznou rychlostí. Nastavením vhodného posuvu a řezné rychlosti, se zlepšila drsnost povrchu a tvorba třísek.[34]

V závěru bylo vyhodnoceno, že nucené kmitání ovlivňovalo tvoření třísek a drsnost povrchu. [34]

## 2 Návrh experimentální činnosti frézování

V progresivních metodách obrábění dochází v posledních letech k nesmírně rychlému rozvoji vědy a techniky. Rok od roku se zvyšují nároky na produktivitu obrábění, proto se vyvíjí stále nové metody obrábění. Do těchto progresivních metod řadíme:

- HSC (High Speed Cutting) – vysokorychlostní obrábění.
- DC (Dry Cutting) – suché obrábění.
- HC (Hard Cutting) – tvrdé obrábění.
- HFC/HFM (High Feed Cutting/High Feed Milling) – vysokoposuvové frézování.
- HPM (High Performance Machining) – vysokovýkonné obrábění.

Použitím těchto metod se zkracují výrobní časy a zvyšuje se kvalita obrobeného povrchu. [11]

### 2.1 Vysokoposuvové frézování

Vysokoposuvové frézování je produktivní metoda, která vyžaduje speciální nástroje a strojní vybavení. Je nutno dodržet určitá pravidla NC programování na CNC strojích a také v programu CAM. Umožňuje produktivnější obrábění, protože se dosáhne třikrát rychlejší frézování než u klasického frézování. Úběr materiálu je s malou hloubkou řezu ( $a_p$ ) cca do 2 mm a vysokým posuvem na zub ( $f_z$ ) až 3 mm a dokáže odstranit až 1400 cm<sup>3</sup> materiálu za minutu. Tyto podmínky garantují zkrácení strojních časů. Při hrubování lze zvýšit rychlost posuvu až na desetinásobek. Při hrubovacím procesu lze dosáhnout kvalitně obrobené plochy. [13]

### 2.2 Výhody a nevýhody vysokoposuvového frézování

Velkou výhodou metody HFM je směr působení výsledné síly při obrábění, která vede ke snižování vibrací, zvětšení stability řezného procesu, zvýšení životnosti nástroje. Největší výhodou je zvýšení produktivity obrábění. Oproti konvenčnímu obrábění lze dosáhnout až 60 % snížení výrobního času. Zvýšením produktivity se dosahuje tím, že menší hloubka řezu se nahrazuje potřebným zvýšením řezné rychlosti. Řezné síly a příkon jsou nižší než u jiných progresivních metod obrábění. Proto nástroje dosahují vyšší životnosti, a to je způsobeno nízkým opotřebením ostří. Budou se moci frézovat materiály s problematickými vlastnostmi, jako jsou vysoká tvrdost,



dobrá houževnatost, nízká tepelná vodivost, nižší obsah síry nebo vyšší obsah manganu.

Frézy se dají konstruovat s větším vyložení, a to až 7 násobek jejich průměru, ale musí se vždycky použít speciální držáky nástrojů, které tlumí vibrace a dochází ke snižování deformací nástroje. Tím, že výsledná síla působí do vřetene stroje, dochází k maximální stabilitě procesu, a to bez vibrací. HFM metodou se může dosáhnout až extrémní úběr materiálu.

Nevýhodou je vysoce nákladné strojní vybavení, které má speciální upnutí pro nástroje, do kterých se vkládají speciální nástroje s vysokou pořizovací cenou.

### 2.3 Řezné materiály pro HFM

Pro vysokoposuvové frézování se vyrábí řezné materiály, které mají vysokou pevnost, tvrdost, houževnatost, odolnost proti opotřebení, odolnost proti oxidaci a chemickému působení. Řezné materiály jsou nejčastěji z kvalitního substrátu slinutého karbidu s povlakem. SK se vyrábí práškovou metalurgií procesem slinování práškových karbidů (karbid wolframu, karbid titanu a kobalt). Výhoda je, že mají vysokou tvrdost za vysokých teplot s dobrou lomovou houževnatostí. Pro zlepšení řezných vlastností se používá povlakování PVD nebo CVD. PVD neboli Physical Vapour Deposition (nanášení odpařením z pevné fáze) je technologická příprava tenkých vrstev s vynikajícími chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Vynikají tím, že mají nízké tření, vysokou odolnost proti teplotě, otěru, korozi a kyselinám a vyznačují se vysokou tvrdostí. Je založeno na principu uvolnění nanesené látky ze zdrojového terče a přenosu uvolněného materiálu na povrch nástroje. CVD neboli Chemical Vapour Deposition (chemická depozice vrstev) je proces, kde je nástroj uzavřen v hermetickém reaktoru ve směsi plynů, při teplotě 1000°C. Směsi plynů dodávají kovové a nekovové příměsi, které reagují na povrchu nástroje a vytváří povlak. Těmito metodami se vytváří povlaky:

- TiN – vytvoří tenkou vrstvu povlaku odolnou proti oxidaci,
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – vytvoří jemnozrnnou tenkou vrstvu, která chrání čelo nástroje před oxidací,
- TiCN – vytvoří houževnatou spojovací vrstvu zajišťující vysokou přilnavost povrchu. [16], [17], [18]

## 2.4 Nástroje pro HFM

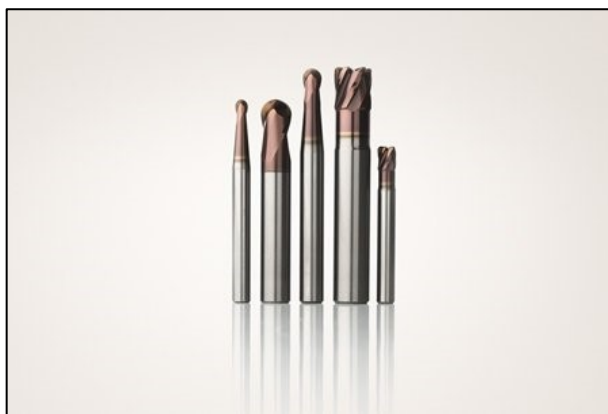
Výběr nástroje pro HFM je ovlivněn několika faktory např. vysoká spolehlivost, trvanlivost, příznivé pořizovací náklady. Nástroje zajišťují urychlení řezného procesu, ale také zlepšují silové namáhání obráběcího uzlu a snižují chvění. Frézy jsou vyrobeny většinou s vnitřním chlazením, protože to umožňuje přímé chlazení místa řezu. Průměr frézy se volí v závislosti na velikosti obráběné plochy. Využívají se nejčastěji frézy s VBD pro hrubování a nebo monolitní karbidové frézy.

Nástroje s VBD pro HFM, využívají tvarové a rozměrově robustní břitové destičky s malým úhlem nastavení hlavního ostří. Destičky jsou konstruovány tak, aby v kombinaci s řeznými podmínkami umožnily zvyšování rychlosti úběru, ale taky ke zlepšení stability a spolehlivosti. Stabilita se využívá hlavně u většího vyložení nástroje. [20]



*Obr. 9 Řada fréz s VBD pro HFM [27]*

Monolitní karbidové frézy jsou vyrobeny s celkovou geometrií, geometrií ostří a karbidovou třídou. Frézy vytvořené pro HFM mají zesílené ostří chráněné fazetkou, utvářečem třísek, rohovými rádiusy nebo srážením, které společně se speciálním tvarem drážky zajišťují bezpečné utváření a odvod třísek. Mají také specifické tvary čelní části zubů. Vyrábí se ze speciálně upravených substrátů karbidu a povlakuji se, tím se zlepšují jejich vlastnosti. [21]



*Obr. 10 Monolitní karbidové frézy Jabro-Tornado [19]*

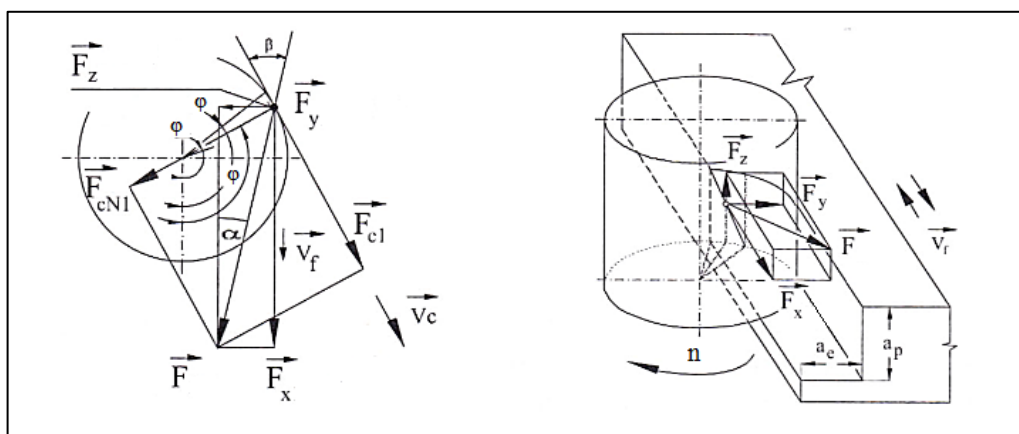
## **2.5 Řezný proces pro HFM**

Vysokoposuvové frézování vyžaduje pro svůj řezný proces kvalitní řezné materiály, které jsou vysoce výkonné, tepelně vodivé, tvrdé, houževnaté a hlavně jsou povlakovány, aby se zvýšily jejich vlastnosti a vytvořila se tepelně izolační vrstva, která snižuje přenos tepla do břitu nástroje. Zvýšením řezné rychlosti dojde k rychlé změně mechanických a chemických vlastností, proto se tvoří odlišný řezný proces než u konvenčního frézování. Tříska změkne a sníží se přitlačná síla k čelu nástroje. Dochází tím ke snížení tření, snížení průřezu třísky a snížení celkového řezného odporu, ale zase se zvětší rychlost odchodu třísky z kontaktní zóny a úhel smykové roviny se také zvětší. Výhodou je vysoká teplota třísky, která je kladným faktorem HFM, proto se nemusí chladit. Chlazením by docházelo k bránění vysokoposuvového režimu. [22]

## **2.6 Řezné síly**

Řezné síly patří mezi faktory v průběhu řezání. Pomáhají porozumět obráběcím procesům a jednotlivým dějům doprovázených při obrábění. Znalost řezného procesu z pohledu řezných sil umožňuje optimalizovat jednotlivé procesy a předcházet kritickým situacím z oblasti bezpečnosti práce. Řezné síly jsou omezujícím faktorem některého druhu technologie. Mají zásadní vliv na přesnost obrobku a kvalitu obrobené plochy, vlivem stability řezného procesu. Řezná síla je jedním z nejcitlivějších indikátorů z energetického hlediska při výkonu obrábění a dodává informace o celkovém množství vygenerovaného tepla. Porozumění řezným silám a chování během řezného procesu umožní optimální volbu řezných nástrojů, obráběcích strojů a řezných podmínek. Jedna z výhod je zlepšení kvalitativních a kvantitativních aspektů procesů obrábění a využití obrábění různých druhů materiálu.

Na řezné síly mají zásadní vliv řezná rychlost, materiál obrobku a ostatní parametry procesu. Řezná rychlost má zásadní vliv na proces obrábění. Zvyšováním řezné rychlosti dochází k poklesu řezných sil, a to hlavně vlivem obráběného materiálu. Čím je materiál obrobku tvrdší, tím jsou řezné síly větší. Posuv a hloubka řezu mají vliv na řezné síly z hlediska jejich zvyšování. Platí, že zvýšením hloubky řezu a posuvu složky řezné síly rostou. Řezné síly z pohledu nástroje lze charakterizovat tak to: čím ostřejší bude řezná hrana, tím nižší budou řezné síly. [23]



Obr. 11 Rozklad řezných sil pro čelní frézování [26]

## 2.7 Čelní frézování

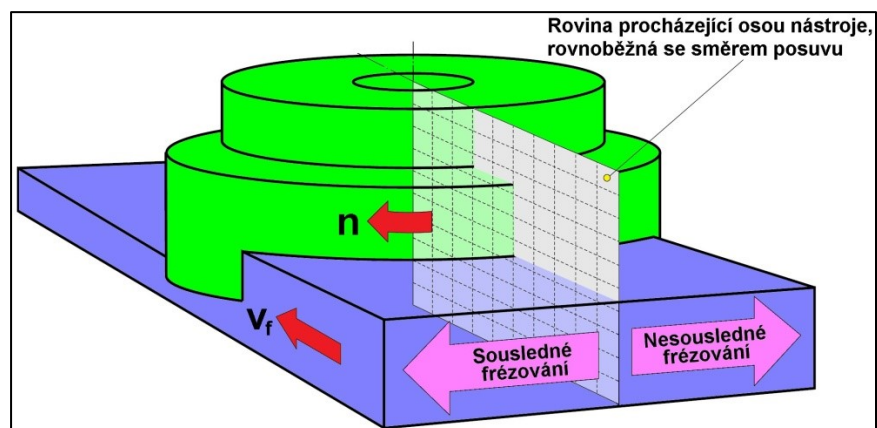
Čelní frézování patří mezi nejběžnější frézovací operace. Používá se pro velké množství různých nástrojů, nejčastěji frézy válcové, které mají bříty na obvodu, ale také na čelní ploše nástroje. Volí se frézy s úhlem nastavení  $45^\circ$  nebo  $90^\circ$ , nebo se používají frézy do rohu, frézy s kruhovými vyměnitelnými destičkami.

Osa otáčení nástroje je kolmá na obráběnou plochu. Platí, že při každém otočení nástroje o  $360^\circ$  se materiál posune o hodnotu posuvu na otáčku. Zuby odřezávají třísku stejně velkého průřezu. Materiál je odřezávaný zuby na obvodě frézy a zuby na čele plochu hladí. Průměr nástroje se volí často 2x až 3x větší než šířka obráběné plochy.

Výhody čelního frézování:

- produktivní, rovnoměrný a plynulý chod stroje,
- vysoká tuhost nástroje,
- klidné frézování, protože v záběru je několik zubů současně,
- volí se větší posuvy. [29]

Čelní frézování se rozděluje podle polohy osy otáčení frézy vzhledem k obráběné ploše na symetrické a nesymetrické. Během symetrického čelního frézování osa nástroje protíná osu obráběné plochy. U nesymetrického osa nástroje je mimo osu obráběné plochy. [38]



Obr. 12 Čelní frézování [38]

### 3 Provedení experimentálního testování

#### 3.1 Popis experimentu

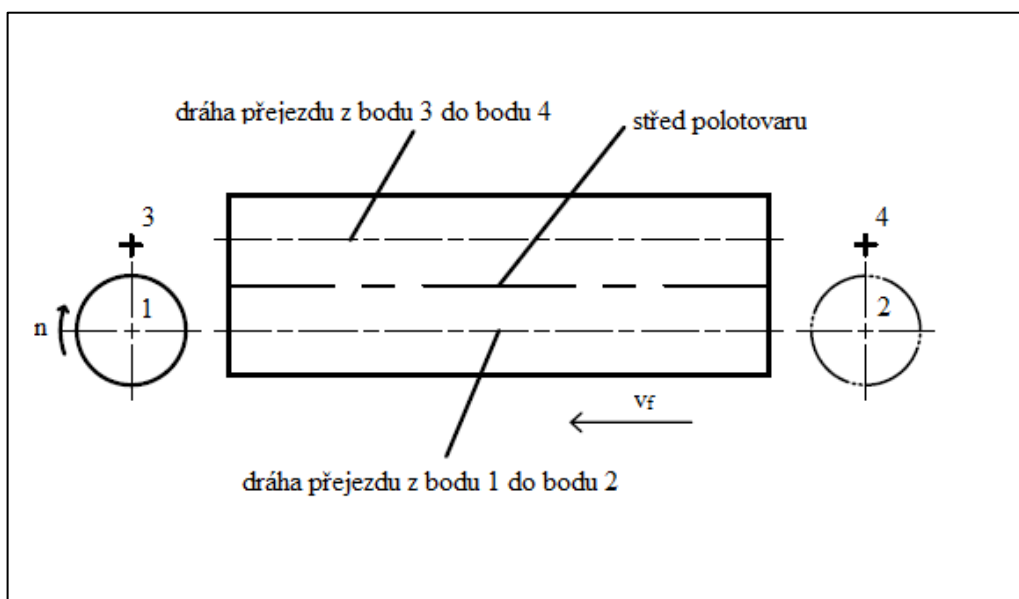
Experimentální část bakalářské práce se zabývá technologií vysokoposuvového frézování austenitické oceli 1.4404 (X2CrNiMo 17 – 12 – 2) dle ČSN 17349.4. Celý experiment se prováděl na VŠB – TUO, FS, Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Obráběcím strojem bylo frézovací centrum DMG MORI DMU 50. Jako nástroj byla použita frézovací hlavička, držák a vyměnitelné břitové destičky od firmy Pramet Tools s. r. o.. Vyměnitelné břitové destičky není možno publikovat, proto se všechny řezné parametry volily na základě doporučení výrobce.

Cílem experimentální činnosti je stanovit složky řezné síly  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  a výslednou sílu  $F$  a parametry drsnosti povrchu  $R_a$ ,  $R_z$  v závislosti na posuvu na zub  $f_z$  [mm], hloubce řezu  $a_p$  [mm] pro VBD SNGX 07 – 25 a VBD SNGX 07 – 35. Destičky byly vyhodnoceny a porovnány mezi sebou za předem stanovených řezných podmínek. Během pokusu byla neměněna řezná rychlost  $v_c$  [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ], počet zubů  $z$  [-], šířka záběru  $a_e$  [mm] a otáčky  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ]. Měněny byly pouze parametry posuvu na zub  $f_z$  [mm], rychlost posuvu  $v_f$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ] a hloubka řezu  $a_p$  [mm].

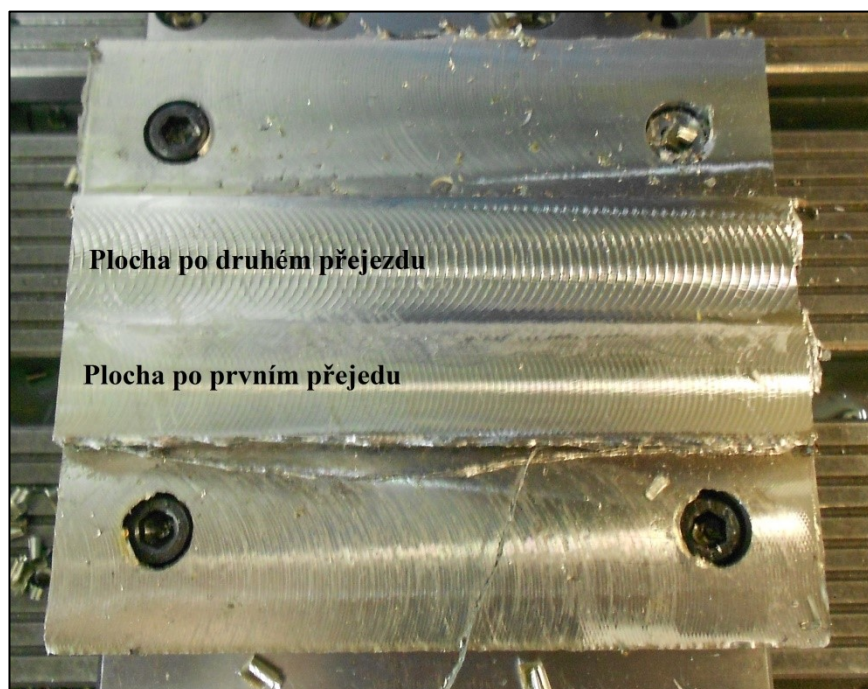
Před začátkem experimentu byl upnut dynamometr Kistler 9129AA na otočný stůl frézovacího centra DMG MORI DMU 50 a poté byl zapojen do zesilovacího zařízení Kistler typ 5070. Zesilovač byl propojený s PC soustavou, ve kterém byl nainstalován software DynoWare pro vyhodnocení složek řezných sil. Na dynamometru byla upevněna austenitická ocel 1.4404. Pro obrábění bylo zvoleno čelní vysokoposuvové frézování za sucha, za předem zvolených řezných podmínek. Frézovaná délka byla 114 mm a celá šířka plochy měřila 38 mm. Průběh frézování byl proveden v celé délce a šířka byla rozdělena na dva přejezdy po 19 mm s překrytím frézované plochy 82 %. Efektivní průměr frézy měl hodnotu 23 mm.

Proces experimentů probíhal následujícím způsobem. Postavení frézy vůči obrobku je znázorněno na Obr. 13. Přejezd frézy byl z bodu 1 do bodu 2 po tomto přejezdu byla pootočená vyměnitelná břitová destička. Následně fréza přejela do bodu 3 a z bodu 3 se frézovalo do bodu 4. Během každého přejezdu byly měřeny složky řezných sil pomocí dynamometru Kistler 9129AA s připojeným zesilovacím zařízením Kistler typ 5070. Po vyfrézování celé šířky se upnul drsnoměr SURFEST SJ – 210 a byla měřena drsnost povrchu pro oba přejezdy. Další měření probíhalo stejným způsobem. Celkem se provedlo 14 testů.

Z naměřených dat byly vypracovány grafy, tabulky a závěry a byla provedena diskuze a doporučení.



*Obr. 13 Schéma přejezdu pro čelní vysokoposuvové frézování*



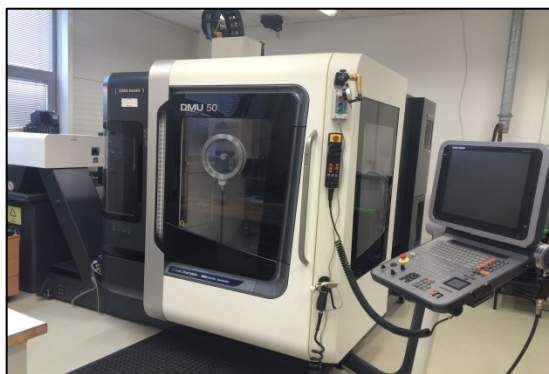
*Obr. 14 Obrobená plocha po prvním a druhém přejezdu frézy*

### 3.2 Obráběcí stroj

Experiment vysokoposuvového frézování se prováděl na univerzálním 5 - osém frézovacím stroji DMG MORI DMU 50 od firmy DMG MORI. Tento stroj se vyznačuje inovativní konstrukční technologií. Jako jsou digitální pohony ve všech osách, rychloposuv a vysoký výkon vřetene. Frézky nabízí ideální základ pro výrobu drobných a jednoduchých součástí. Řídicím systémem je Heidenhain iTNC 530 HSCI. [35]

*Tabulka 3 Technické parametry stroje DMG MORI DMU 50 [35]*

<b>Funkce</b>	<b>Technické parametry</b>	<b>Jednotky</b>
Pojezdy v osách X, Y, Z	500, 450, 400	mm
Otáčky	20 – 18000	min <sup>-1</sup>
Upínání dle DIN 69871	HSK – A63	-
Výkon (40/100 % zatížení)	35 / 25	kW
Točivý moment	130 / 87	Nm
Rychloposuv	24000	mm.min <sup>-1</sup>
Rozměr otočného stolu	630 x 500	mm
Povolené zatížení stroje	300	kg
Počet nástrojů	16	ks
Hmotnost stroje	4480	kg

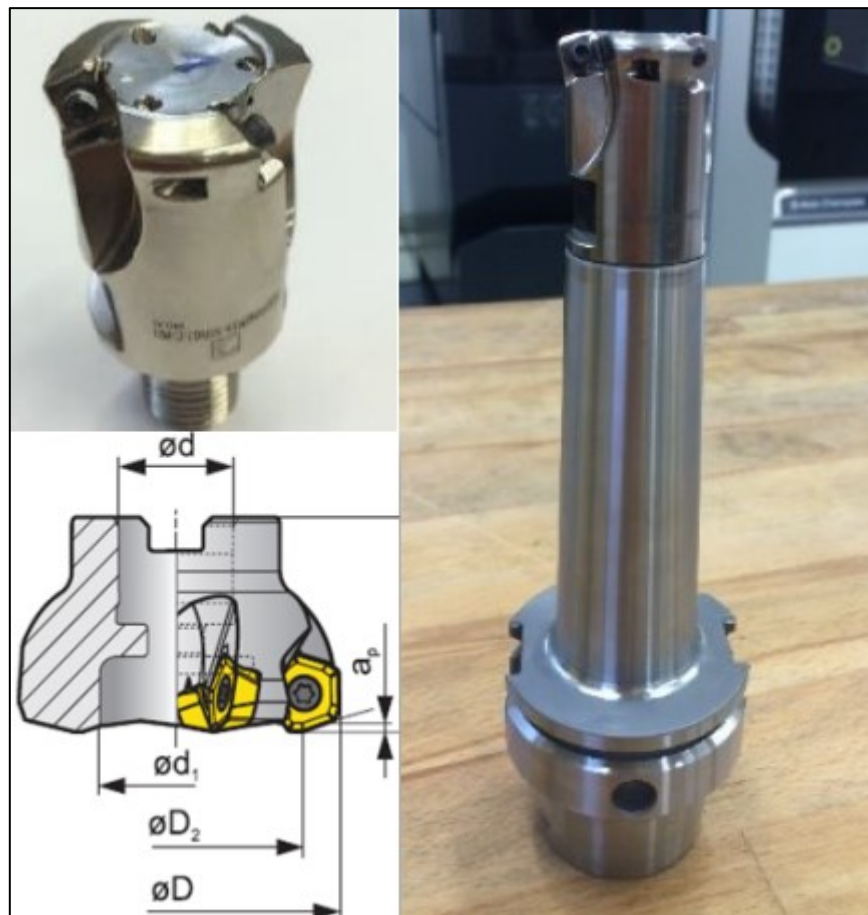


*Obr. 15 Frézovací stroj DMG MORI DMU 50*



### 3.3 Obráběcí nástroj

V experimentální části byla použita frézovací hlavička s označením 32E3R040M16 – SSNO7 – C – P01 a osazena jednou VBD. Hlavička byla upnuta do držáku HSK 63 – M16 – 126 L = 100 (DIN69893A).



Obr. 16 Frézovací hlavička 32E3R040M16-SSNO7-C-P01 a držák HSK63 – M16 – 126  
 $L = 100(\text{DIN69893A})$

Tabulka 4 Parametry frézovací hlavičky 32E3R040M16 - SSNO7 – C - P01

$\phi D$ [mm]	$\phi D_2$ [mm]	$\kappa_r$ [°]	$L$ [mm]	$Z$ [–]
32	21,6	15,8	140	1

### 3.3.1 Vyměnitelné břitové destičky

Pro daný experiment byly zvoleny oboustranné čtvercové VBD SNGX07T308SR – MM – P01; M8340 (25  $\mu\text{m}$  96007259) a SNGX07T308SR – MM – P01; M8340 (35  $\mu\text{m}$  96007260). Zvolené VBD měly zaoblené řezné hrany na 25  $\mu\text{m}$  a 35  $\mu\text{m}$  s utvářečem P01.



Obr. 17 VBD SNGX07T308SR – MM – P01

### 3.4 Řezné podmínky

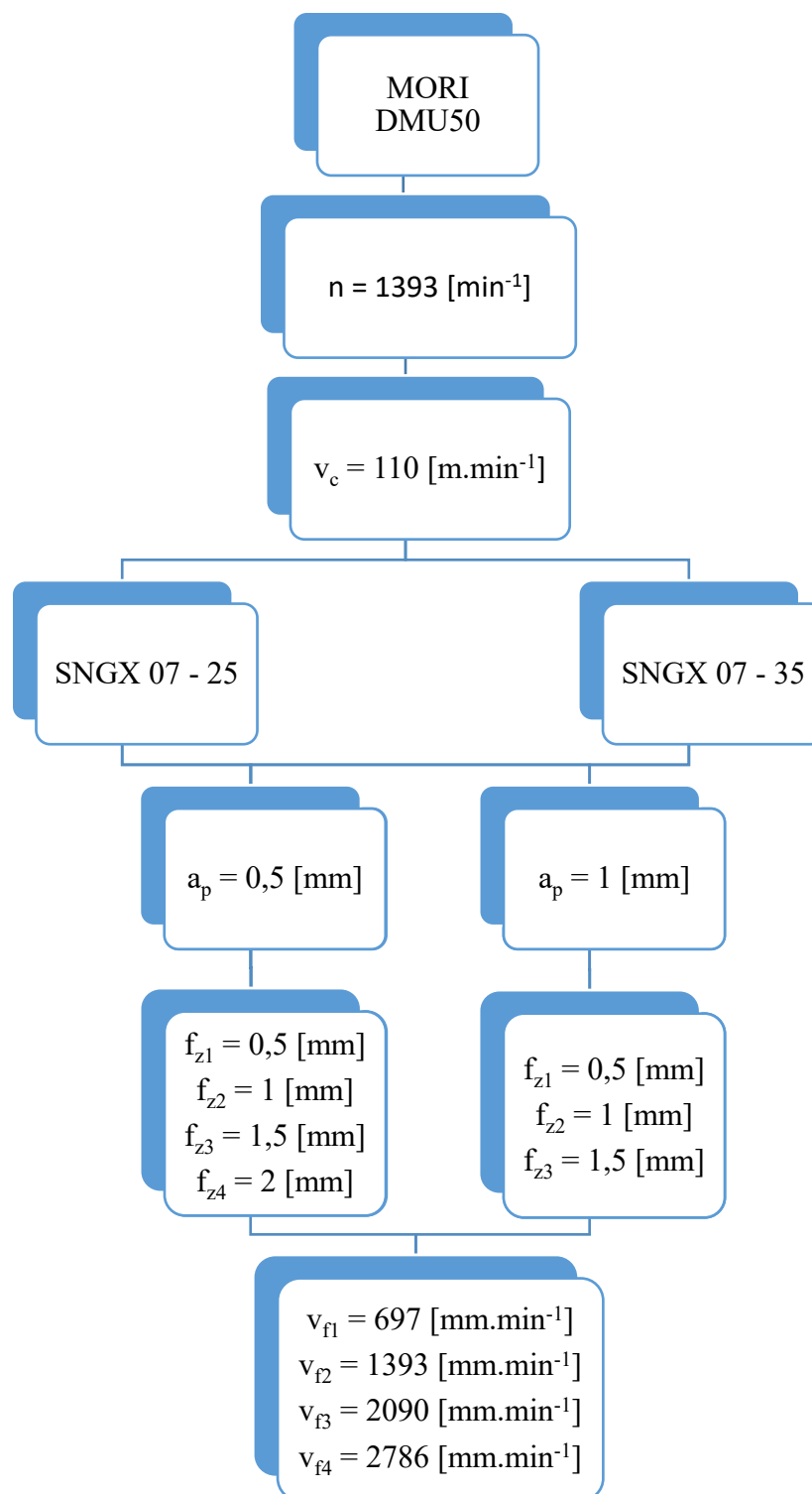
Pro austenitickou ocel bylo zvoleno čelní vysokoposuvové frézování na stroji DMG MORI DMU50. Během experimentu byla konstantní řezná rychlost  $v_c = 110 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ , počet zubů  $z = 1$ , šířka záběru  $a_e = 19 \text{ [mm]}$  a otáčky  $n = 1393 \text{ [min}^{-1}\text{]}$ . Posuv na zub  $f_z$ , rychlost posuvu  $v_f$  a hloubka řezu  $a_p$  se upravovaly.

Tabulka 5 Řezné podmínky pro experiment

Řezná rychlost $v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	Počet zubů $z$ [-]	Otáčky $n$ [min <sup>-1</sup> ]	Posuv za zub $f_z$ [mm]	Rychlost posuvu $v_f$ [mm.min <sup>-1</sup> ]	Hloubka řezu $a_p$ [mm]	Šířka záběru $a_e$ [mm]
110	1	1393	0,5	697	0,5	19
			1	1 393		
			1,5	2 090		
			2	2 786		
			0,5	697	1	
			1	1393		
			1,5	2090		

### 3.4.1 Schéma navrženého experimentu

Pro daný experiment bylo vytvořeno blokové schéma viz Obr. 18



Obr. 18 Blokové schéma experimentu

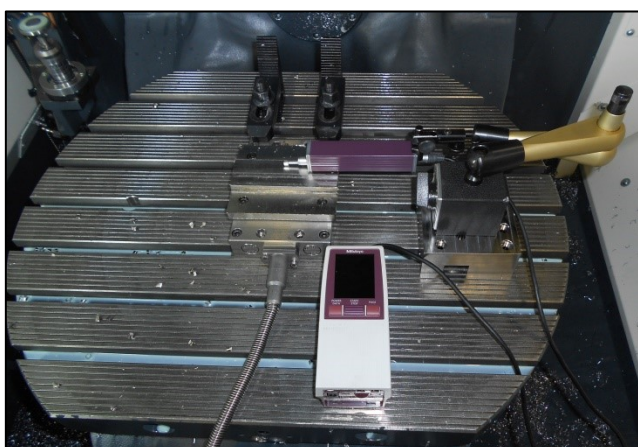
### 3.5 Použitá měřidla

#### 3.5.1 Drsnoměr SURFEST SJ – 210

Drsnost povrchu vzorku byla měřena drsnoměrem SURFEST SJ – 210 od firmy Mitutoyo. Jedná se o přenosné měřicí zařízení na měření drsnosti povrchu. Během měření se záznam profilu ukládá v reálném čase a má přímý přístup k vyhodnocovacím křivkám. Poskytuje rychlý přehled o výsledcích zkoušek. Přístroj je vybaven bezpečnostním systémem, který zamezuje poškození snímacího hrotu. [36]

*Tabulka 6 Technické parametry SURFEST SJ – 210 [36]*

Funkce	Technické parametry	Jednotky
Rozsah měření	16	mm
Rychlost měření	0,25; 0,5; 0,75	mm.s <sup>-1</sup>
Poloměr patky měření	40	mm
Měřicí síla snímače	0,75	mN
Úhel snímacího hrotu	60	°
Poloměr snímacího hrotu	2	μm
Hmotnost	500	g
Snímací metoda	diferenciální indukčnost	-
Snímací dotek	diamantový hrot	-



*Obr. 19 Upnutí drsnoměru SURFEST SJ - 210 během experimentu*

### 3.5.2 Dynamometr Kistler 9129 AA

Pro měření řezných sil při obrábění byl použit stacionární dynamometr 9129AA od společnosti Kistler Eastern Europe s. r. o.. Přístrojem se zjišťovaly silové poměry při frézování oceli 1.4404 (X2CrNiMo17–12-2) dle ČSN 17349.4. Slouží k získání experimentálních dat soustavy stroj – nástroj – obrobek z hlediska dynamické stability řezného procesu. Skládá se ze tří komponentních snímačů, které jsou namontovány pod vysokým předpětím. Umožňuje měření tří složek výsledného vektoru síly a tří složek výsledného momentového vektoru. Během pokusu byl dynamometr zapojený v zesilovací zařízení Kistler type 5070. Přístroj převádí měřený signál na elektrické napětí a zesiluje měřený signál pro následné zpracování a vyhodnocení. Výsledná data byla zpracována softwarem DynoWare. [15]



*Obr. 20 Zesilovací zařízení Kistler type 5070 a dynymometr Kistler 9129AA [15]*

## 4 Zhodnocení dat a diskuze výsledků

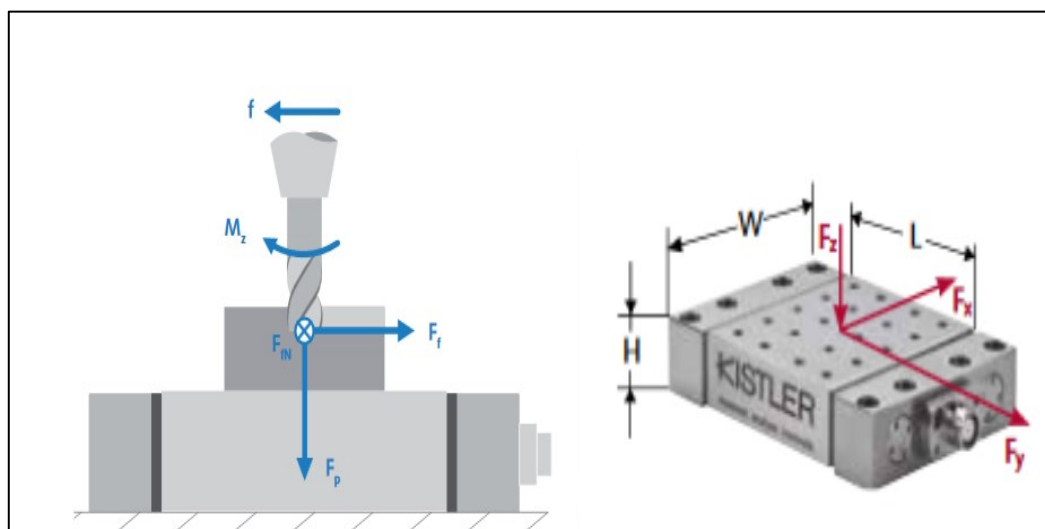
Experimentální část bakalářské práce se zabývá vyhodnocením řezných sil a drsnosti povrchu, při změnách posuvu na zub  $f_z$ , hloubce řezu  $a_p$ , pro VBD SNGX 07 – 25 a VBD SNGX 07 – 35. Destičky byly vyhodnoceny a porovnány mezi sebou za předem stanovených řezných podmínek. V experimentální části se provádělo celkem 14 testů. Frézovaná délka byla 114 mm a šířka 19 mm, po každém testu byly měřeny složky řezné síly  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  a parametry drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$ .

### 4.1 Řezné síly

#### 4.1.1 Vyhodnocení a analýza řezných sil při frézování

Během měření bylo pomocí dynamometru Kistler 9129AA naměřeno velké množství dat o složkách řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ . Hodnoty složek byly během frézování materiálu převáděny přes software DynoWare. Grafy softwaru znázorňují silové zatížení během jednoho úběru danou VBD za předem stanovených řezných podmínek. Měření se provádělo pro čelní vysokoposuvové frézování austenitické oceli 1.4404.

Během experimentu bylo naměřeno vysoké množství dat. Velké množství dat, udávala vysoká vzorkovací frekvence, která vytváří záznamy obsahující nepodstatná nebo nadbytečná data. Jsou to data zaznamenávaná během náběhu nástroje do materiálu a přeběhu z materiálu do obrobku. Pro odstranění těchto dat se využívalo filtrace, aby se dostalo využitelných informací o silovém zatížení.



Obr. 21 Schéma rozložení řezných sil použitých během experimentu [15]

#### 4.1.2 Označení vyměnitelné břitové destičky

Pro zpracování a vyhodnocení bylo zvoleno následující označení VBD:

- SNGX 07 – 25,
- SNGX 07 – 35,

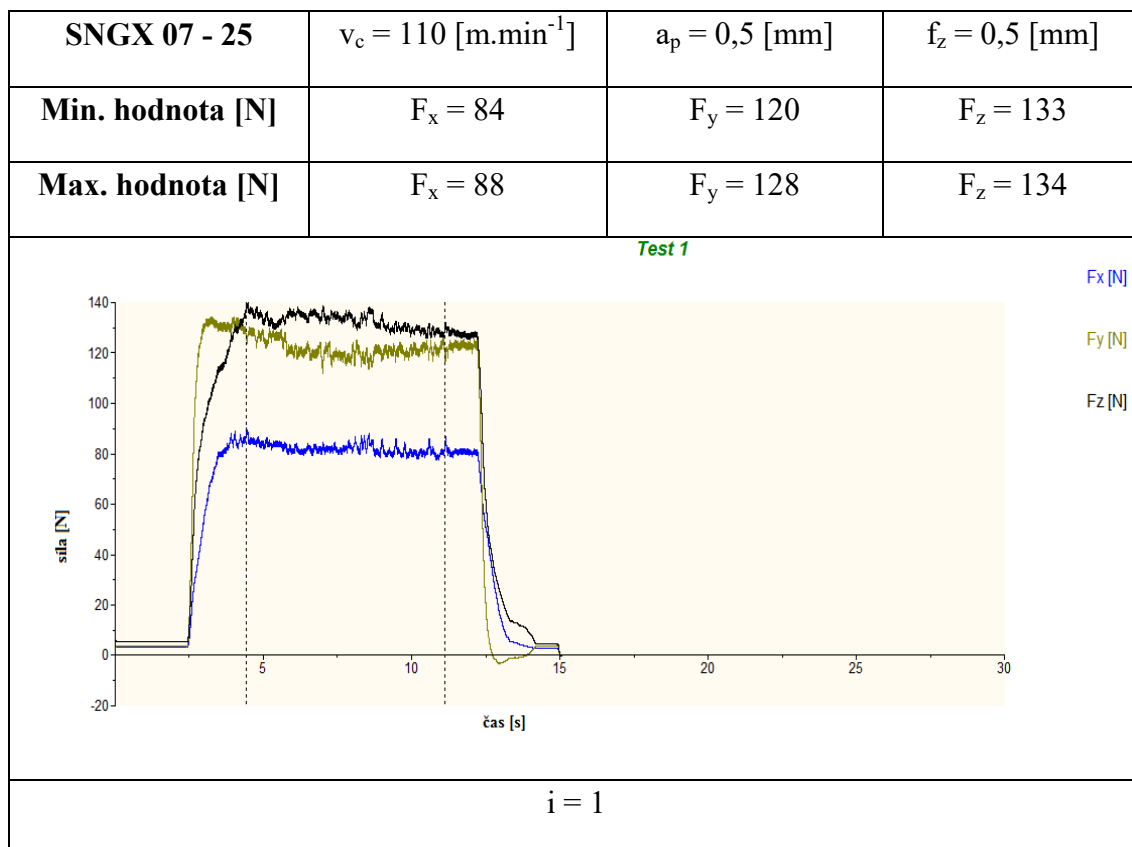
SNGX 07 – označení vyměnitelné břitové destičky,

25 – zaoblení řezné hrany.

#### 4.1.3 Měření složek $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 0,5$ [mm]

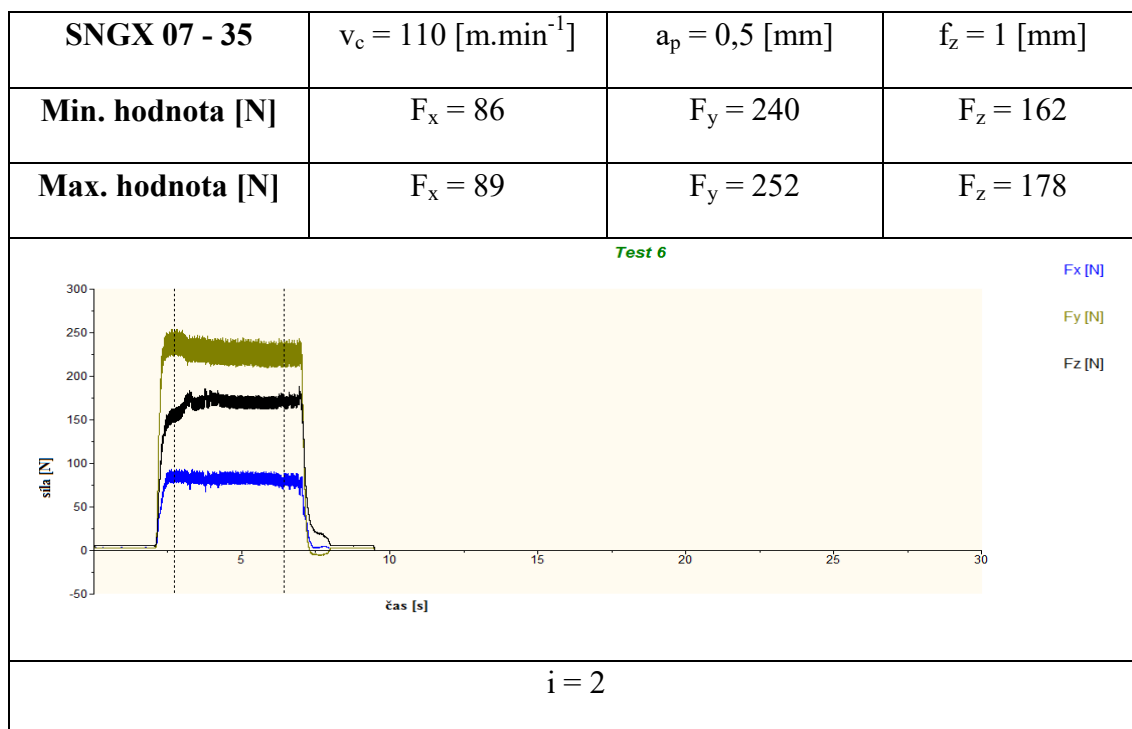
Hodnoty složek řezných sil byly odečteny z grafu v programu DynoWare.

*Tabulka 7 Průběh měření složek řezných sil pro  $f_z = 0,5$  [mm] a  $a_p = 0,5$  [mm]*



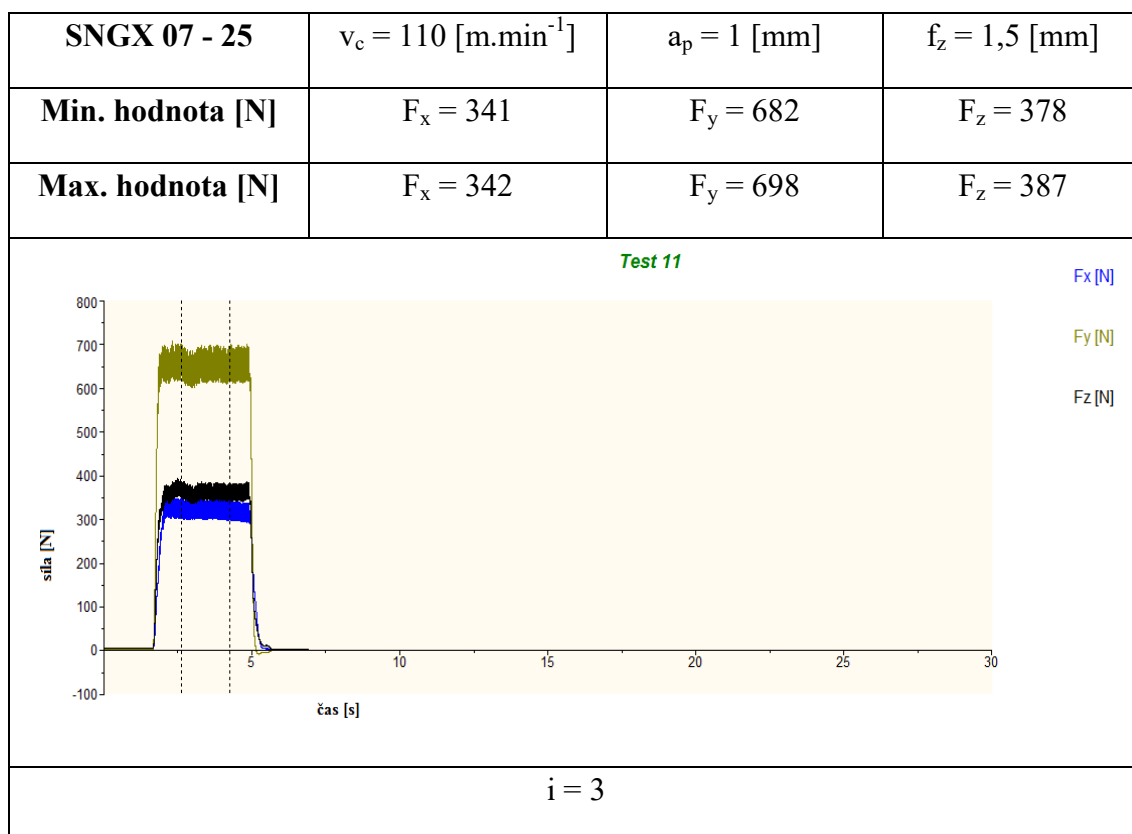
#### 4.1.4 Měření složek $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 1$ [mm]

Tabulka 8 Průběh měření složek řezných sil  $f_z = 1$  [mm] a  $a_p = 0,5$  [mm]



#### 4.1.5 Měření složek $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 1,5$ [mm]

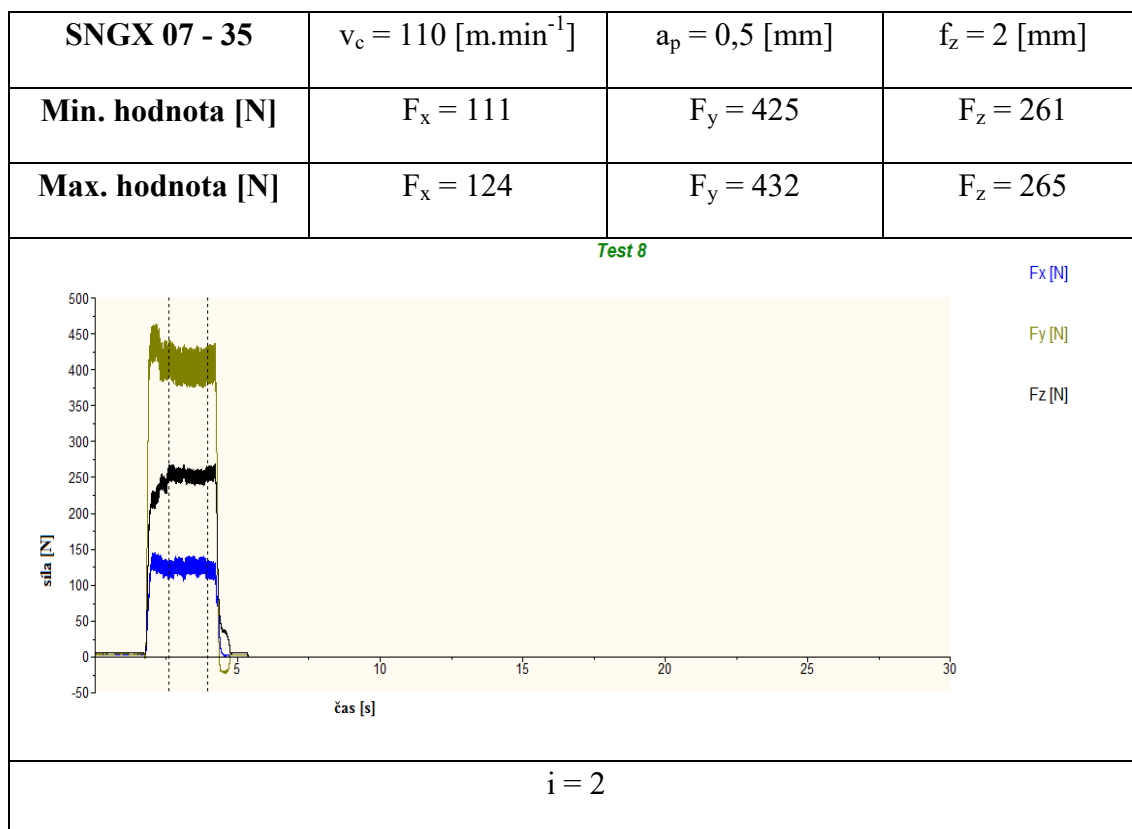
Tabulka 9 Průběh měření složek řezných sil  $f_z = 1,5$  [mm] a  $a_p = 1$  [mm]





#### 4.1.6 Měření složek $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 2$ [mm]

Tabulka 10 Průběh měření složek řezných sil  $f_z = 2$  [mm] a  $a_p = 0,5$  [mm]



#### 4.1.7 Maximálně naměřené hodnoty $F_x$ , $F_y$ , $F_z$

Tabulka 11 Maximálně naměřené složky řezných sil

$F_x$ [N]				$F_y$ [N]				$F_z$ [N]			
$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
<b><math>f_z = 0,5</math> [mm]</b>											
88	85	154	105	128	125	227	225	134	143	209	173
<b><math>f_z = 1</math> [mm]</b>											
78	89	154	220	231	252	446	427	156	178	256	291
<b><math>f_z = 1,5</math> [mm]</b>											
154	157	342	226	321	311	698	708	211	216	387	366
<b><math>f_z = 2</math> [mm]</b>											
128	124	-	-	429	432	-	-	233	265	-	-

#### 4.1.8 Zpracování hodnot silového zatížení

Naměřené hodnoty složek řezných sil byly vypočítány jako výsledná síla při frézování austenitické oceli 1.4404. Pro stanovení výsledné síly předcházelo statistické zpracování naměřených hodnot. Postup výpočtu byl znázorněný pro VBD SNGX 07 – 25 a posuv na zub  $f_z = 0,5$  [mm], hloubku řezu  $a_p = 0,5$  [mm] a řeznou rychlost  $v_c = 110$  [m.min<sup>-1</sup>].

##### Postup výpočtu:

Z programu DynoWare se naměřily hodnoty řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  celkem 10 krát. Hodnoty byly odečteny z grafu. Poté se provedla kontrola na hrubé chyby, které vznikají nesprávným způsobem zpracování a nesprávným měřením.

**Příklad výpočtu pro VBD SNGX 07 – 25 pro posuv na zub  $f_z = 0,5$  [mm], hloubku řezu  $a_p = 0,5$  [mm] a řeznou rychlost  $v_c = 110$  [m.min<sup>-1</sup>].**

##### Výběrový průměr: [37]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$\bar{F} = \frac{839}{10} = 83,9 \text{ N}$$

##### Výběrová směrodatná odchylka: [37]

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$s_F = \sqrt{\frac{150,9}{10-1}} = 4,09 \text{ N}$$

Kde:

$x_i$  – naměřené veličiny

$\bar{x}$  – průměrná hodnota

$n$  – počet měření

**Standartní nejistota typu A ( $u_A$ ): [37]**

$$u_A = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

$$u_A = \frac{4,09}{\sqrt{10}} = 1,29 \text{ N}$$

Kde:

$s(\bar{x})$  – směrodatná odchylka

$x_i$  – naměřené veličiny

$\bar{x}$  – průměrná hodnota

$n$  – počet měření

**Rozšířená nejistota: [37]**

$$U = k_U \cdot u_A \quad (4)$$

$$U = 2 \cdot 1,29 = 2,59 \text{ N}$$

Kde:

$k_U$  – koeficient pokrytí byl zvolený 2, který odpovídá spolehlivosti překrytí 95 %.

**Celková směrodatná odchylka pro celkovou sílu F: [37]**

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} = \bar{F} \pm U \quad (5)$$

$$F = \sqrt{83,9^2 + 123,2^2 + 133,6^2} = 200,166 \text{ N}$$

Kde:

$F_x$  – síla normálová

$F_y$  – síla posuvová

$F_z$  – síla pasivní

### Výpočet celkové rozšířené nejistoty: [37]

$$\frac{\partial F}{\partial F_x} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}} \cdot 2F_x = \frac{F_x}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}} = \frac{F_x}{F} \quad (6)$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_y} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}} \cdot 2F_y = \frac{F_y}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}} = \frac{F_y}{F} \quad (7)$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_z} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}} \cdot 2F_z = \frac{F_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}} = \frac{F_z}{F} \quad (8)$$

$$s_{(F)} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial F_x} \cdot s_{(F_x)}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial F_y} \cdot s_{(F_y)}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial F_z} \cdot s_{(F_z)}\right)^2} \quad (9)$$

$$s_{(F)} = \sqrt{\left(\frac{83,9}{200,16} \cdot 4,09\right)^2 + \left(\frac{123,2}{200,16} \cdot 8,09\right)^2 + \left(\frac{133,6}{200,16} \cdot 3,62\right)^2} = 5,79 \text{ N}$$

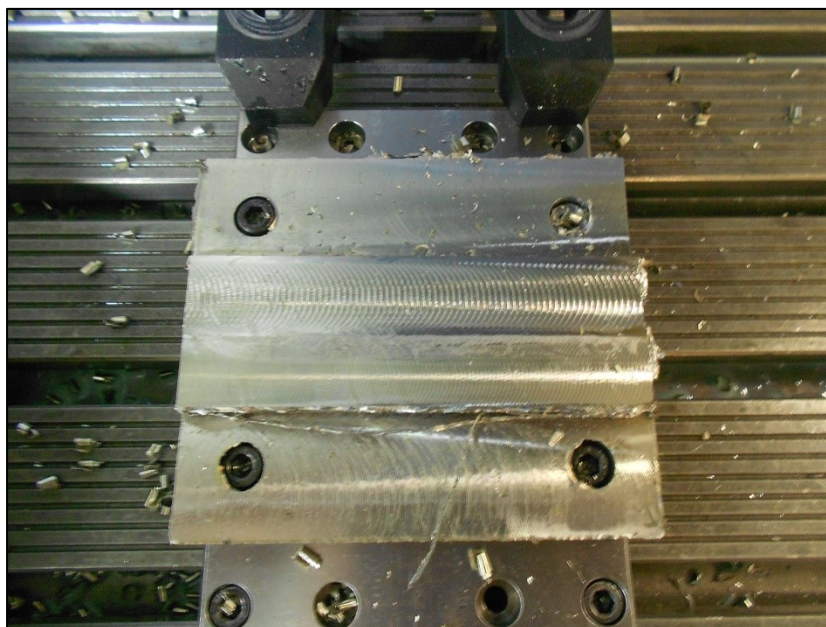
$$u_A = \frac{5,79}{\sqrt{10}} = 1,83 \text{ N}$$

$$U = 2 \cdot 1,83 = 3,68 \text{ N}$$

### Zápis celkové síly F:

$$F = 200,16 \pm 3,68 \text{ N}$$

Hodnoty z programu DynoWare a shrnutí viz Tabulka 12.



Obr. 22 Upnutí obrobku v dynamometru Kistler 9129AA

Tabulka 12 Výsledné hodnoty pro VBD SNGX 07 – 25,  $f_z = 0,5$  [mm],  $a_p = 0,5$  [mm],  
 $v_c = 110$  [m.min<sup>-1</sup>]

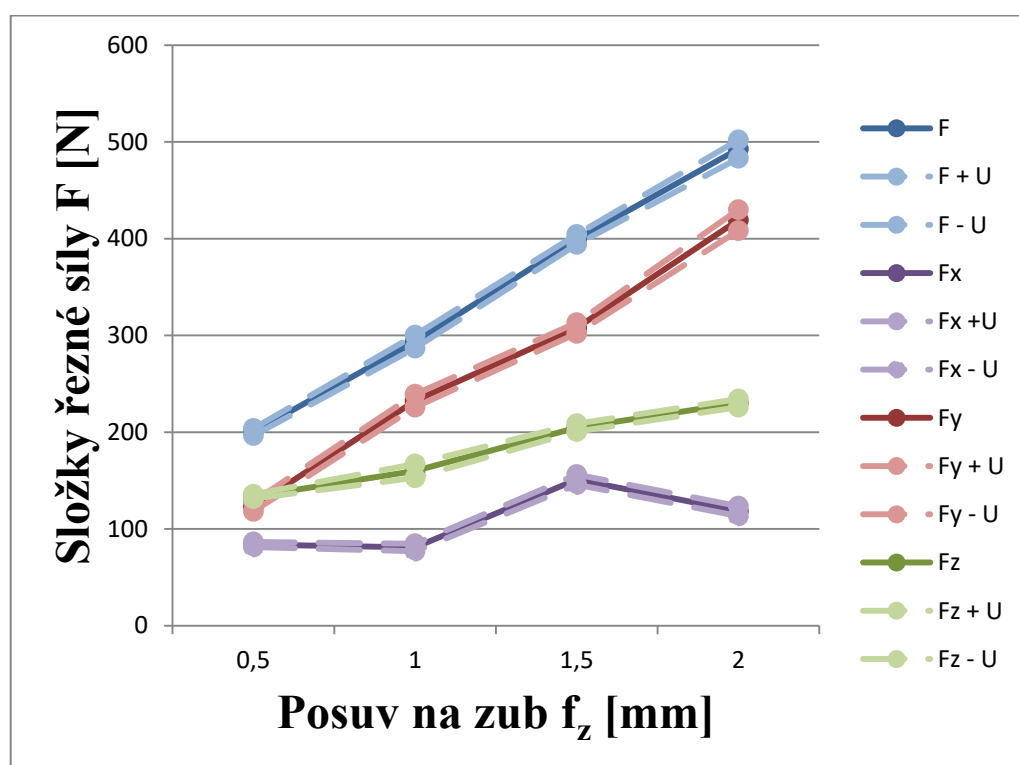
Složky řezných sil	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]
Naměřené hodnoty složek F <sub>x</sub> , F <sub>y</sub> , F <sub>z</sub>	92	138	136
	80	115	131
	80	130	132
	84	112	135
	88	128	133
	84	120	134
	79	125	135
	83	128	134
	87	121	126
	82	115	140
Suma	839	1232	1336
Výběrový průměr $\bar{F}$	83,9	123,2	133,6
Výběrová směrodatná odchylka $s_F$	4,09	8,09	3,627
Nejistota typu A	1,29	2,56	1,15
Rozšířená nejistota U	2,59	5,12	2,29
Celková síla F	200,2		

#### 4.1.9 Závislost řezné síly na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 25, $a_p = 0,5$ mm

Porovnání závislosti parametrů řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  a  $F$  a jejich rozšířené nejistoty měření pro konstantní hloubku řezu  $a_p = 0,5$  [mm], řeznou rychlost  $v_c = 110$  [m.min<sup>-1</sup>].

Tabulka 13 Hodnoty silového zatížení pro VBD SNGX 07 – 25 a konstantní hloubku řezu  $a_p = 0,5$  mm a řeznou rychlost  $v_c = 110$  m.min<sup>-1</sup>

$f_z$ [mm]	$F_x \pm U$ [N]	$F_y \pm U$ [N]	$F_z \pm U$ [N]	$F \pm U$ [N]
<b>0,5</b>	$83,9 \pm 2,59$	$123,2 \pm 5,12$	$133,6 \pm 2,29$	<b><math>200,2 \pm 3,68</math></b>
<b>1</b>	$80,9 \pm 3,88$	$232,5 \pm 6,72$	$160 \pm 7,17$	<b><math>293,6 \pm 6,69</math></b>
<b>1,5</b>	$151 \pm 5,27$	$307,7 \pm 5,57$	$204,7 \pm 4,06$	<b><math>399,2 \pm 5,17</math></b>
<b>2</b>	$118,5 \pm 5,17$	$419,2 \pm 10,8$	$230,1 \pm 4,2$	<b><math>492,7 \pm 9,5</math></b>



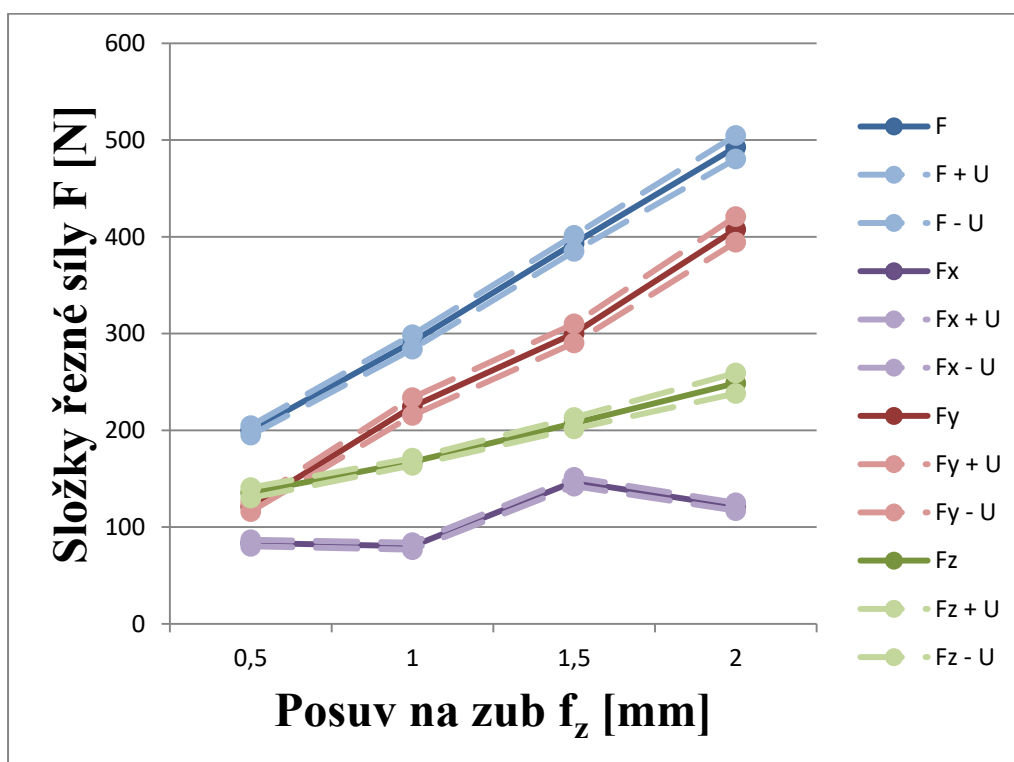
Graf 1 Závislost řezných sil a jejich rozšířené nejistoty měření pro VBD SNGX 07 - 25 v závislosti na posuvu na zub, při konstantní hloubce řezu  $a_p = 0,5$  mm a řezné rychlosti  $v_c = 110$  m.min<sup>-1</sup>

#### 4.1.10 Závislost řezné síly na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 35, $a_p = 0,5$ mm

Porovnání závislosti parametrů řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  a  $F$  a jejich rozšířené nejistoty měření pro konstantní hloubku řezu  $a_p = 0,5$  [mm], řeznou rychlost  $v_c = 110$  [m.min<sup>-1</sup>].

Tabulka 14 Hodnoty silového zatížení pro VBD SNGX 07 – 35 a konstantní hloubku řezu  $a_p = 0,5$  mm a řeznou rychlost  $v_c = 110$  m.min<sup>-1</sup>

$f_z$ [mm]	$F_x \pm U$ [N]	$F_y \pm U$ [N]	$F_z \pm U$ [N]	$F \pm U$ [N]
<b>0,5</b>	83,5 $\pm$ 3,41	121 $\pm$ 4,93	135,5 $\pm$ 5,36	<b>199,9 <math>\pm</math> 4,91</b>
<b>1</b>	80,2 $\pm$ 3,65	224,6 $\pm$ 9,13	167,5 $\pm$ 3,76	<b>291,4 <math>\pm</math> 7,43</b>
<b>1,5</b>	146,9 $\pm$ 4,57	300,2 $\pm$ 9,84	207,4 $\pm$ 5,82	<b>393,3 <math>\pm</math> 8,29</b>
<b>2</b>	121,1 $\pm$ 4,07	407,7 $\pm$ 13,1	248,7 $\pm$ 10,5	<b>492,7 <math>\pm</math> 12,1</b>



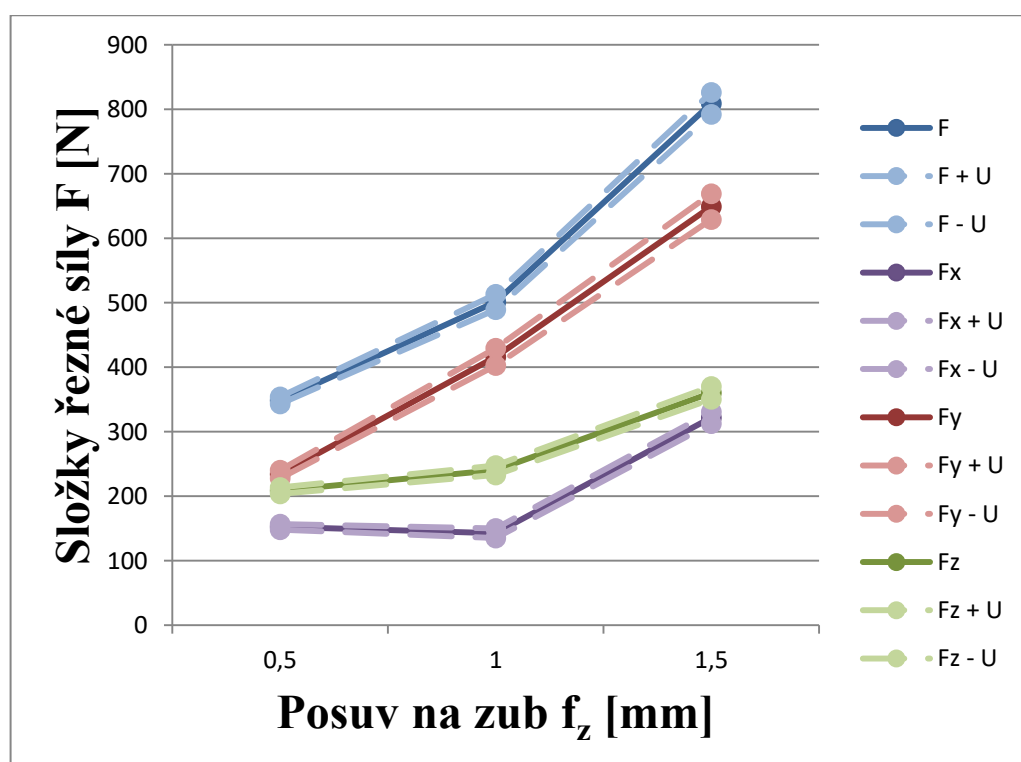
Graf 2 Závislost řezných sil a jejich rozšířené nejistoty měření pro VBD SNGX 07 - 35 v závislosti na posuvu na zub, při konstantní hloubce řezu  $a_p = 0,5$  mm a řezné rychlosti  $v_c = 110$  m.min<sup>-1</sup>

#### 4.1.11 Závislost řezné síly na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 25, $a_p = 1 \text{ mm}$

Porovnání závislosti parametrů řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  a  $F$  a jejich rozšířené nejistoty měření pro konstantní hloubku řezu  $a_p = 1 \text{ [mm]}$ , řeznou rychlost  $v_c = 110 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ . Posuv na zub  $f_z = 2 \text{ [mm]}$  se z důvodu nadměrného hluku a vysokých vibrací neuskutečnil.

Tabulka 15 Hodnoty silového zatížení pro VBD SNGX 07 – 25 a konstantní hloubku řezu  $a_p = 1 \text{ mm}$  a řeznou rychlost  $v_c = 110 \text{ m.min}^{-1}$

$f_z \text{ [mm]}$	$F_x \pm U \text{ [N]}$	$F_y \pm U \text{ [N]}$	$F_z \pm U \text{ [N]}$	$F \pm U \text{ [N]}$
<b>0,5</b>	$152,4 \pm 4,3$	$234,1 \pm 6,28$	$208,6 \pm 5,04$	<b><math>348,6 \pm 5,51</math></b>
<b>1</b>	$142,6 \pm 7,44$	$416,2 \pm 13,4$	$240,3 \pm 7,27$	<b><math>501,2 \pm 11,8</math></b>
<b>1,5</b>	$321,7 \pm 9,1$	$649,1 \pm 19,9$	$360,3 \pm 9,93$	<b><math>809,1 \pm 17</math></b>



Graf 3 Závislost řezných sil a jejich rozšířené nejistoty měření pro VBD SNGX 07 - 25 v závislosti na posuvu na zub, při konstantní hloubce řezu  $a_p = 1 \text{ mm}$  a řezné rychlosti  $v_c = 110 \text{ m.min}^{-1}$

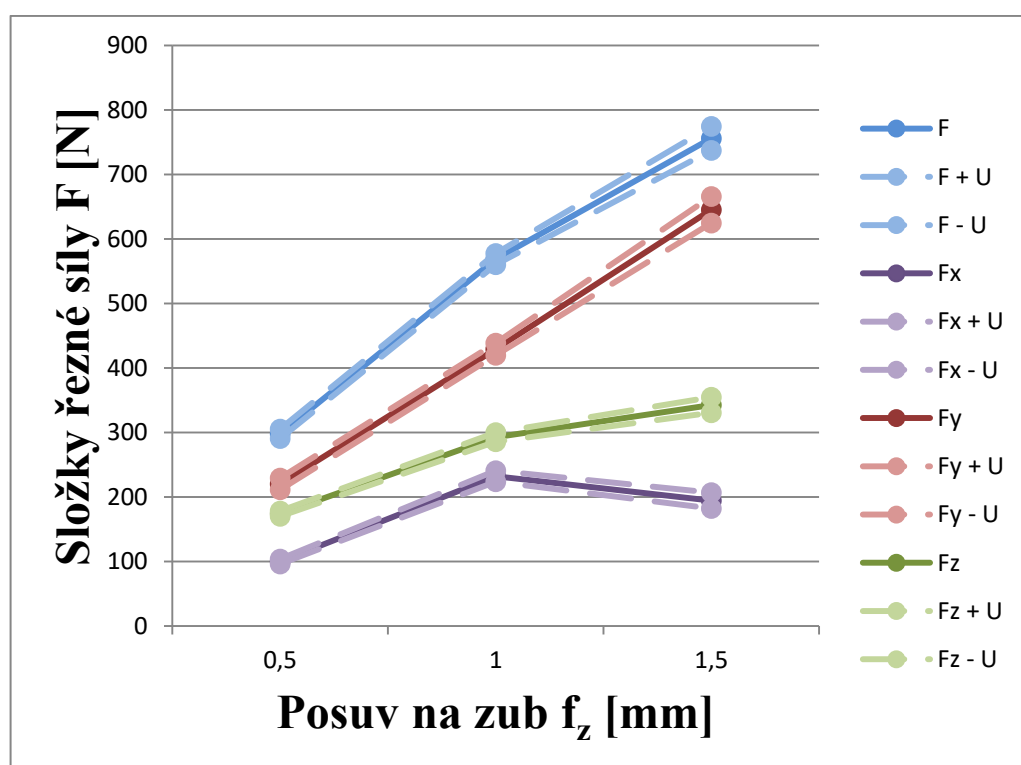


#### 4.1.12 Závislost řezné síly na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 35, $a_p = 1 \text{ mm}$

Porovnání závislosti parametrů řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  a  $F$  a jejich rozšířené nejistoty měření pro konstantní hloubku řezu  $a_p = 1 \text{ [mm]}$ , řeznou rychlost  $v_c = 110 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ . Posuv na zub  $f_z = 2 \text{ [mm]}$  se z důvodu nadměrného hluku a vysokých vibrací neuskutečnil.

Tabulka 16 Hodnoty silového zatížení pro VBD SNGX 07 – 35 a konstantní hloubku řezu  $a_p = 1 \text{ mm}$  a řeznou rychlost  $v_c = 110 \text{ m.min}^{-1}$

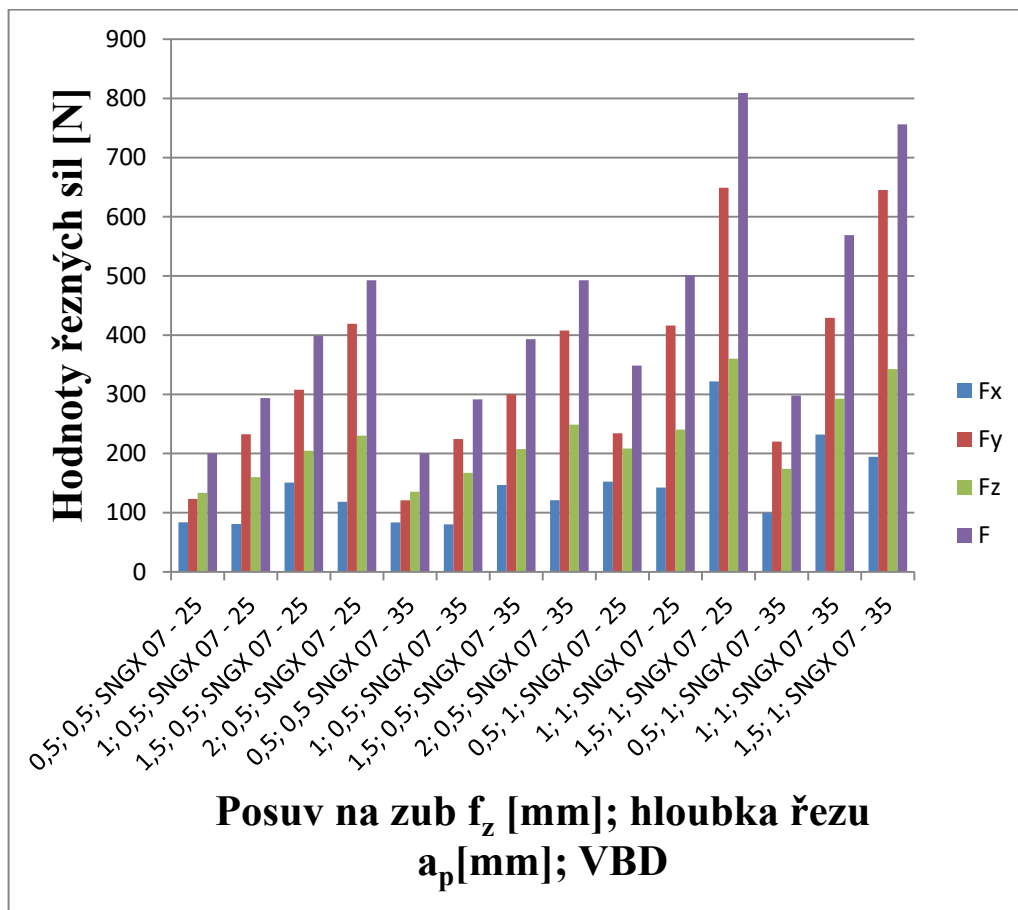
$f_z \text{ [mm]}$	$F_x \pm U \text{ [N]}$	$F_y \pm U \text{ [N]}$	$F_z \pm U \text{ [N]}$	$F \pm U \text{ [N]}$
<b>0,5</b>	$99,9 \pm 3,83$	$220,2 \pm 9,07$	$174,1 \pm 4,04$	<b><math>297,6 \pm 7,23</math></b>
<b>1</b>	$232,1 \pm 8,55$	$429,1 \pm 9,4$	$292,7 \pm 7,02$	<b><math>568,9 \pm 8,69</math></b>
<b>1,5</b>	$194,4 \pm 12,3$	$645,3 \pm 20,5$	$342,6 \pm 11,9$	<b><math>756 \pm 18,62</math></b>



Graf 4 Závislost řezných sil a jejich rozšířené nejistoty měření pro VBD SNGX 07 - 35 v závislosti na posuvu na zub, při konstantní hloubce řezu  $a_p = 1 \text{ mm}$  a řezné rychlosti  $v_c = 110 \text{ m.min}^{-1}$

#### 4.1.13 Porovnání složek řezných sil $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ a $F$ pro VBD SNGX 07 – 25 a SNGX 07 – 35

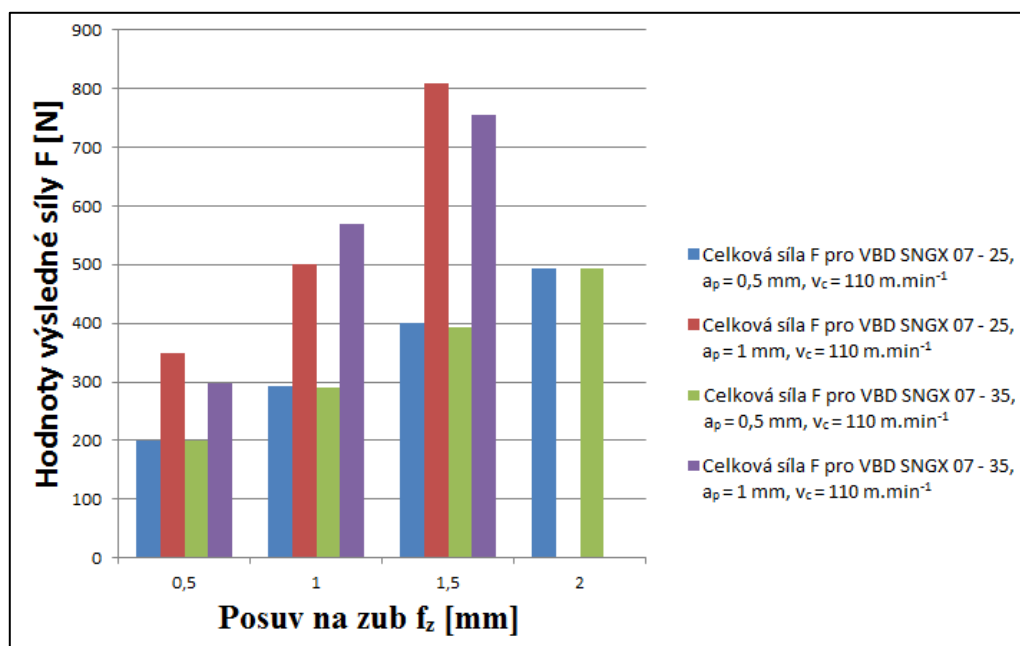
Pro vyhodnocení složek řezných sil a celkové síly  $F$  byly vybrány hodnoty, které nejsou rozšířeny o nejistotu měření. Z grafu 5 lze vyčíst, že při zvyšování posuvu na zub  $f_z$  se zvýší všechny složky řezných sil i celkové zatížení. Dále vyplývá, že při zvýšení hloubky řezu  $a_p$  se složky řezných sil zvýší téměř na dvounásobek.



Graf 5 Porovnání složek řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  a  $F$ , které vznikly při vysokoposuvovém frézování austenitické oceli 1.4404 za konstantní řezné rychlosti  $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

#### 4.1.14 Porovnání výsledné síly $F$ pro VBD SNGX 07 – 25 a SNGX 07 – 35

Pro porovnání výsledné síly  $F$  byly použity hodnoty, které nejsou rozšířené o nejistotu měření. Z Obr. 23 lze vyčíst, že při zvyšování posuvu na zub roste celková síla řezání. Největší síla byla pro VBD SNGX 07 – 25 pro  $f_z = 1,5$  [mm],  $a_p = 1$  [mm] a  $v_c = 110$  [m.min<sup>-1</sup>]. Dále vyplývá, že celková síla řezání pro konstantní hloubku řezu 0,5 mm a zvětšující se posuvem na zub se liší jen o několik Newtonů.



Obr. 23 Graf výsledné hodnoty celkové síly řezání  $F$

#### 4.1.15 Zhodnocení výsledku řezných sil

V experimentální části se porovnávaly řezné síly mezi sebou v závislosti na posuvu na zub a hloubce řezu pro danou VBD. Destičky byly vyhodnoceny z hlediska zaoblení řezné hrany za předem daných řezných podmínek.

Nejmenších řezných sil se dosáhlo pro posuv na zub 0,5 [mm] a hloubku řezu 0,5 [mm], při konstantní řezné rychlosti 110 [m.min<sup>-1</sup>] a otáčkách 1393 [min<sup>-1</sup>]. Destičky SNGX 07 – 25 a SNGX 07 – 35 dosáhly téměř stejných hodnot u všech složek řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  a  $F$  pro porovnání viz Tabulka 17. Jelikož složky řezných sil vycházely podobně, můžeme pro vysokoposuvové frézování austenitické oceli 1.4404 zvolit jak destičku SNGX 07 – 25 tak i destičku SNGX 07 – 35.

Největších řezných sil se dosáhlo u VBD SNGX 07 – 25, pro posuv na zub 1,5 [mm] a hloubku řezu 1 [mm]. Hodnoty řezných sil jsou znázorněny v Tabulce 17.

U vyhodnocení řezných sil experiment dokázal, že čím větší je posuv na zub, tím větší budou řezné síly. Také čím větší se zvolí hloubka řezu, tím větší síly budou.

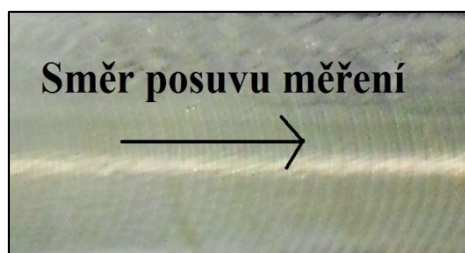
*Tabulka 17 Zhodnocené složky řezných sil*

Nejmenší složky řezných sil [N]							
SNGX 07 - 25				SNGX 07 - 35			
$F_x$	$F_y$	$F_z$	F	$F_x$	$F_y$	$F_z$	F
83,9	123,2	133,6	200,1	83,5	121	135,5	199,9
Největší složky řezných sil [N]							
SNGX 07 - 25							
$F_x$	$F_y$		$F_z$		F		
321,7	649,1		360,3		809,01		

## 4.2 Drsnost povrchu

### 4.2.1 Vyhodnocení drsnosti povrchu

Parametry drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$  byly měřeny pomocí drsnoměru SURFEST SJ – 210. Dotykový snímač drsnoměru byl upnutý pomocí stojánku, který byl připevněný pomocí upínacího zařízení ke stolu frézovacího centra viz Obr. 19. Drsnoměr se připojil k dotykovému snímači přes optický kabel. Celkem se provedlo 14 testů. Drsnost povrchu se měřila pouze v podélné ose, která je rovnoběžná se směrem posuvu. Každá drsnost povrchu se měřila jenom 3 krát.



*Obr. 24 Plocha po posuvu na zub 0,5 mm, hloubce řezu 0,5 mm a řezné rychlosti  $110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  se znázorněným posuvem měření*

#### 4.2.2 Označení vyměnitelným břitovými destičkami

Označení VBD je shodné, jak při měření řezných sil.

#### 4.2.3 Postup výpočtu drsnosti povrchu

Pro získané parametry drsnosti povrchu Ra a Rz se musí provést kontrola na hrubé chyby a vypočítat nejistota měření. Postup výpočtu je pro VBD SNGX 07 – 25 a posuv na zub  $f_z = 0,5$  [mm], hloubku řezu  $a_p = 0,5$  [mm] a řeznou rychlost  $v_c = 110$  [m.min<sup>-1</sup>].

##### Postup výpočtu hrubé chyby:

Výběrový průměr a výběrová směrodatná odchylka byla stanovena dle vzorců 1 a 2. [37]

##### Výběrový průměr: [37]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{x} = \frac{3,653}{3} = 1,218 \mu m$$

##### Výběrová směrodatná odchylka: [37]

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

$$s_{(x)} = \sqrt{\frac{0,003539}{3-1}} = 0,042 \mu m$$

Kde:

$x_i$  – naměřené veličiny

$\bar{x}$  – průměrná hodnota

$n$  – počet měření

### **Odlehlost podezřelých hodnot: [37]**

Výpočet odlehlosti podezřelých hodnot se provádí ze souboru ( $x_2$ ;  $x_n$ ) a stanoví se výpočtem normované hodnoty  $H_2$ ;  $H_n$ .

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} \quad (10)$$

$$H_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)} \quad (11)$$

$$H_2 = \frac{1,218 - 1,215}{0,042} = 0,063$$

Mezní hodnota  $H$  je určena z tabulek na předem stanovenou pravděpodobnost a počet měření. Pro počet měření 3 a pravděpodobnost 95 % je stanovená hodnota  $H = 1,15$ . Hodnota  $H_2 < 1,15$  nebo  $H_n > H$ . Když hodnota  $x_2$  není zatížená hrubou chybou tak, patří do souboru. Pokud hodnota  $x_n$  je zatížená hrubou chybou, tak se ze souboru naměřených hodnot vyloučí.

$$H_2 < 1,15$$

$$0,063 < 1,15$$

Podmínka je splněna hodnotu  $x_2$  není zatížená hrubou chybou a zůstává v souboru naměřených dat.

### **Postup výpočtu nejistoty měření:**

#### **Standartní nejistota typu A ( $u_A$ ): [37]**

$$u_A = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

$$u_A = \frac{0,042}{\sqrt{3}} = 0,0242 \mu m$$

Kde:

$s(\bar{x})$  – směrodatná odchylka

$x_i$  – naměřené veličiny

$\bar{x}$  – průměrná hodnota

$n$  – počet měření

**Standartní nejistota typu B ( $u_B$ ): [37]**

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2} \quad (13)$$

$$u_{B1} = \frac{\bar{x} \cdot 0,03}{k} \quad (14)$$

$$u_{B1} = \frac{1,218 \cdot 0,03}{\sqrt{3}} = 0,021 \mu m$$

$$u_{B2} = \bar{x} \cdot 0,03 \quad (15)$$

$$u_{B2} = 1,218 \cdot 0,03 = 0,036 \mu m$$

$$u_B = \sqrt{0,021^2 + 0,036^2} = 0,042 \mu m$$

Kde:

$u_{B1}$  – nejistota opěrné paty snímacího hrotu

$u_{B2}$  – nejistota měřicího přístroje

$\bar{x}$  – výběrový průměr

$k$  – součinitel rozdělení;  $k = \sqrt{3}$

**Kombinovaná nejistota  $u_C$ : [37]**

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (16)$$

$$u_C = \sqrt{0,024^2 + 0,042^2} = 0,048 \mu m$$

**Rozšířená kombinovaná nejistota ( $U_C$ ): [37]**

$$U_C = k_U \cdot u_C \quad (17)$$

$$U_C = 2 \cdot 0,048 = 0,097 \mu m$$

Kde:

$k_U$  – koeficient pokrytí, byl zvolený 2, který odpovídá spolehlivosti překrytí 95 %.

Tabulka 18 Výsledné hodnoty drsnosti povrchu pro VBD SNGX 07 – 25,  $f_z = 0,5$  [mm],  $a_p = 0,5$  [mm],  $v_c = 110$  [m.min<sup>-1</sup>]

Měřený parametr drsnosti povrchu	Ra [μm]	Rz [μm]
Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu Ra a Rz	1,177	7,002
	1,215	6,751
	1,261	7,02
Suma	3,653	20,773
Výběrový průměr $\bar{x}$	1,218	6,924
Výběrová směrodatná odchylka $s_{(x)}$	0,042	0,14
Standartní nejistota typu A ( $u_A$ )	0,024	0,08
Standartní nejistota typu B ( $u_B$ )	0,021	0,12
Kombinovaná nejistota $u_C$	0,036	0,20
Rozšířená kombinovaná nejistota ( $U_C$ )	0,042	0,23



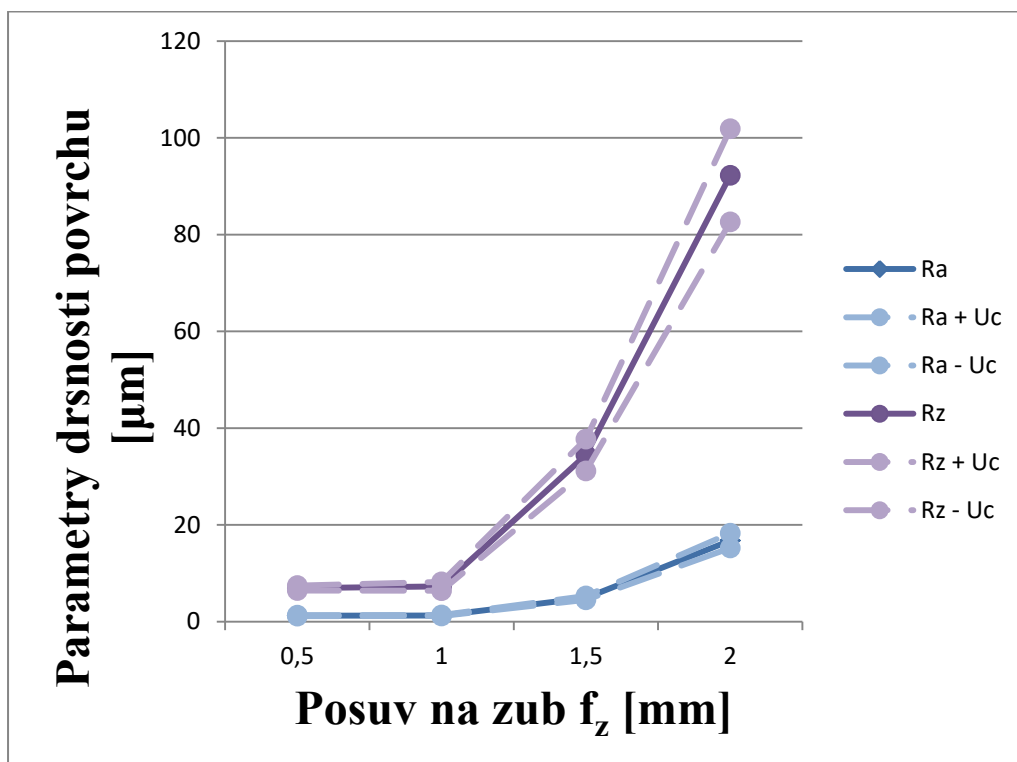
Obr. 25 Detail obrobené plocha pro VBD SNGX 07 - 25,  $f_z = 0,5$  [mm],  $a_p = 0,5$  [mm],  $v_c = 110$  [m.min<sup>-1</sup>]



#### 4.2.4 Závislost drsnosti povrchu na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 25, $a_p = 0,5 \text{ mm}$

Tabulka 19 Hodnoty drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$  pro VBD SNGX 07 - 25 a konstantní hloubku řezu  $0,5 \text{ mm}$  a řeznou rychlost  $110 \text{ m.min}^{-1}$

$f_z [\text{mm}]$	$R_a \pm U_C [\mu\text{m}]$	$R_z \pm U_C [\mu\text{m}]$
0,5	$1,218 \pm 0,097$	$6,924 \pm 0,51$
1	$1,268 \pm 0,102$	$7,298 \pm 0,901$
1,5	$4,902 \pm 0,391$	$34,435 \pm 3,302$
2	$16,745 \pm 1,532$	$92,265 \pm 9,624$

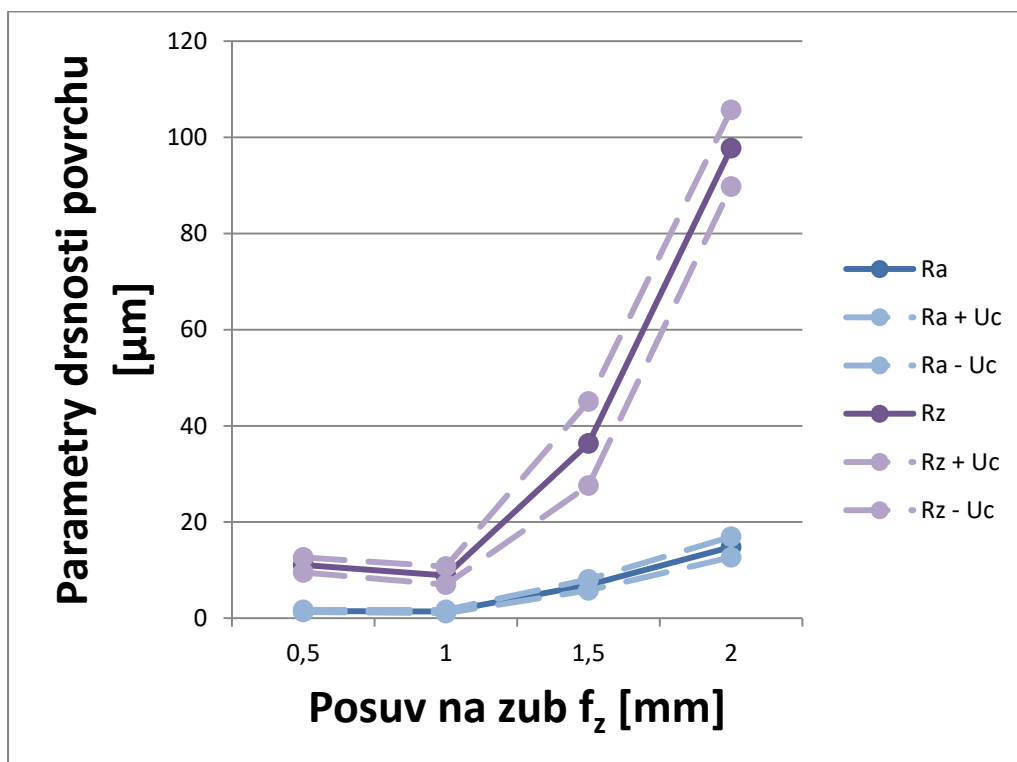


Graf 6 Závislost parametru drsnosti povrchu a jejich rozšířené nejistoty měření pro VBD SNGX 07 -35 v závislosti na posuvu na zub, při konstantní hloubce řezu  $a_p = 0,5 \text{ mm}$  a řezné rychlosti  $v_c = 110 \text{ m.min}^{-1}$

#### 4.2.5 Závislost drsnosti povrchu na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 35, $a_p = 0,5 \text{ mm}$

Tabulka 20 Hodnoty drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$  pro VBD SNGX 07 - 35 a konstantní hloubku řezu  $0,5 \text{ mm}$  a řeznou rychlost  $110 \text{ m.min}^{-1}$

$f_z [\text{mm}]$	$R_a \pm U_C [\mu\text{m}]$	$R_z \pm U_C [\mu\text{m}]$
0,5	$1,507 \pm 0,214$	$11,075 \pm 1,572$
1	$1,392 \pm 0,343$	$8,872 \pm 1,883$
1,5	$6,932 \pm 1,144$	$36,327 \pm 8,724$
2	$14,805 \pm 2,13$	$97,735 \pm 7,971$

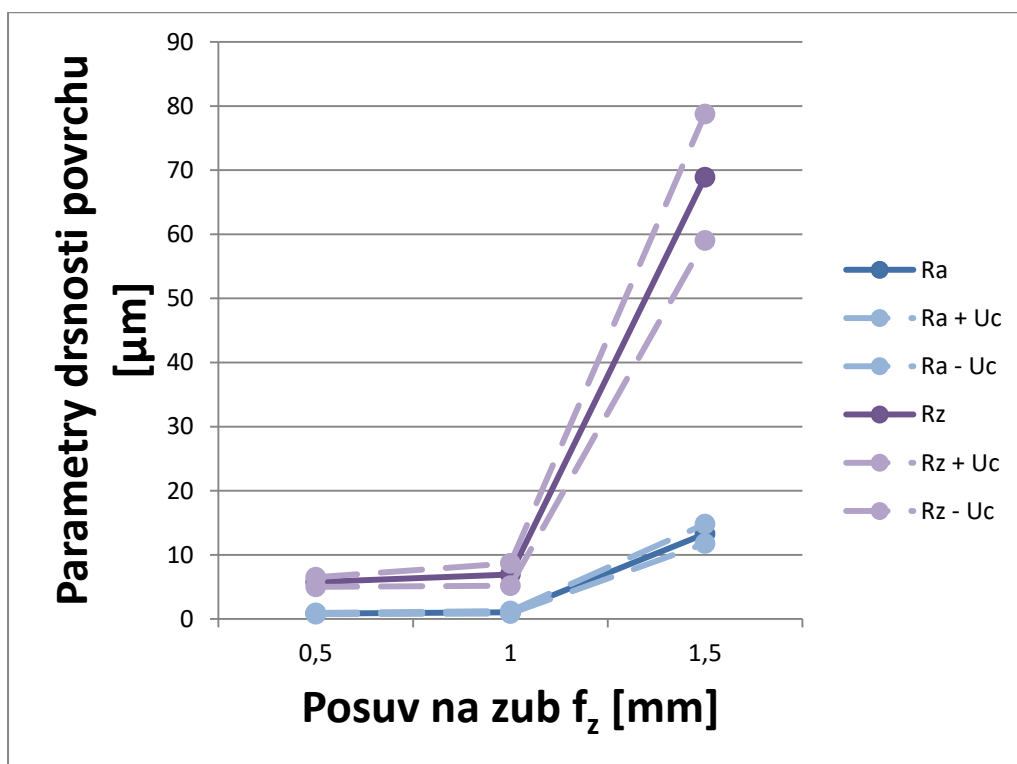


Graf 7 Závislost parametru drsnosti povrchu a jejich rozšířené nejistoty měření pro VBD SNGX 07 -35 v závislosti na posuvu na zub, při konstantní hloubce řezu  $a_p = 0,5 \text{ mm}$  a řezné rychlosti  $v_c = 110 \text{ m.min}^{-1}$

#### 4.2.6 Závislost drsnosti povrchu na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 25, $a_p = 1 \text{ mm}$

Tabulka 21 Hodnoty drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$  pro VBD SNGX 07 - 25 a konstantní hloubku řezu 1 mm a řeznou rychlost  $110 \text{ m.min}^{-1}$

$f_z [\text{mm}]$	$R_a \pm U_C [\mu\text{m}]$	$R_z \pm U_C [\mu\text{m}]$
0,5	$0,843 \pm 0,109$	$5,762 \pm 0,738$
1	$1,043 \pm 0,205$	$6,942 \pm 1,750$
1,5	$13,284 \pm 1,508$	$68,897 \pm 68,897$

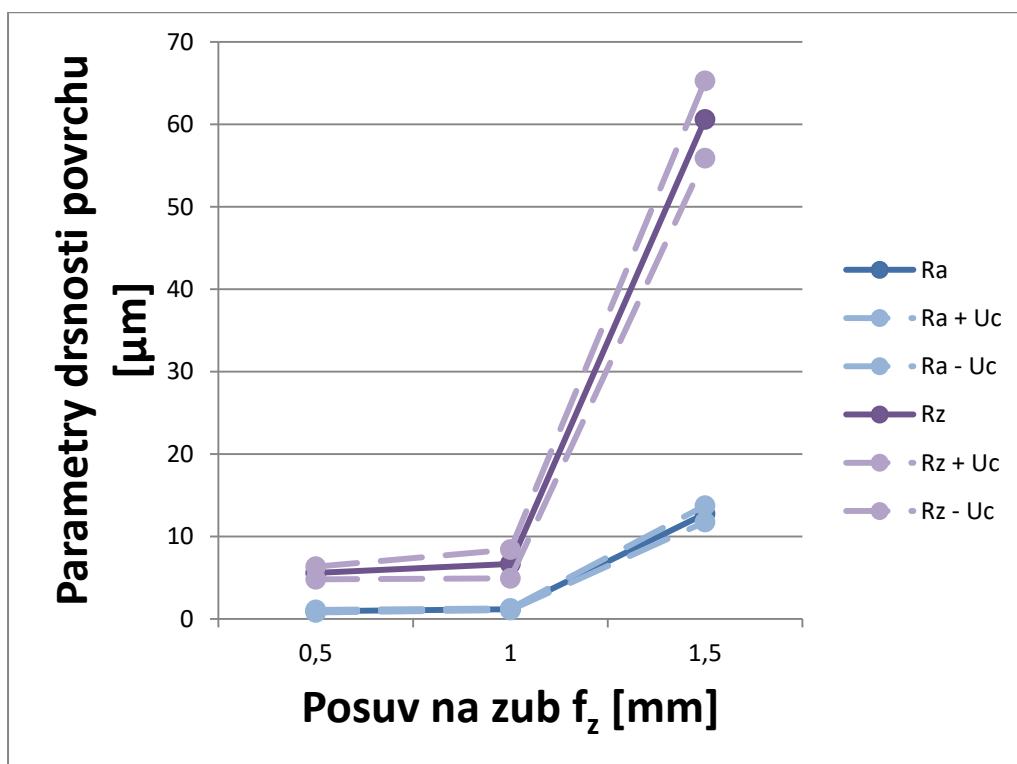


Graf 8 Závislost parametru drsnosti povrchu a jejich rozšířené nejistoty měření pro VBD SNGX 07 -25 v závislosti na posuvu na zub, při konstantní hloubce řezu  $a_p = 1 \text{ mm}$  a řezné rychlosti  $v_c = 110 \text{ m.min}^{-1}$

#### 4.2.7 Závislost drsnosti povrchu na posuvu na zub pro VBD SNGX 07 – 35, $a_p = 1 \text{ mm}$

Tabulka 22 Hodnoty drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$  pro VBD SNGX 07 - 35 a konstantní hloubku řezu 1 mm a řeznou rychlost  $110 \text{ m.min}^{-1}$

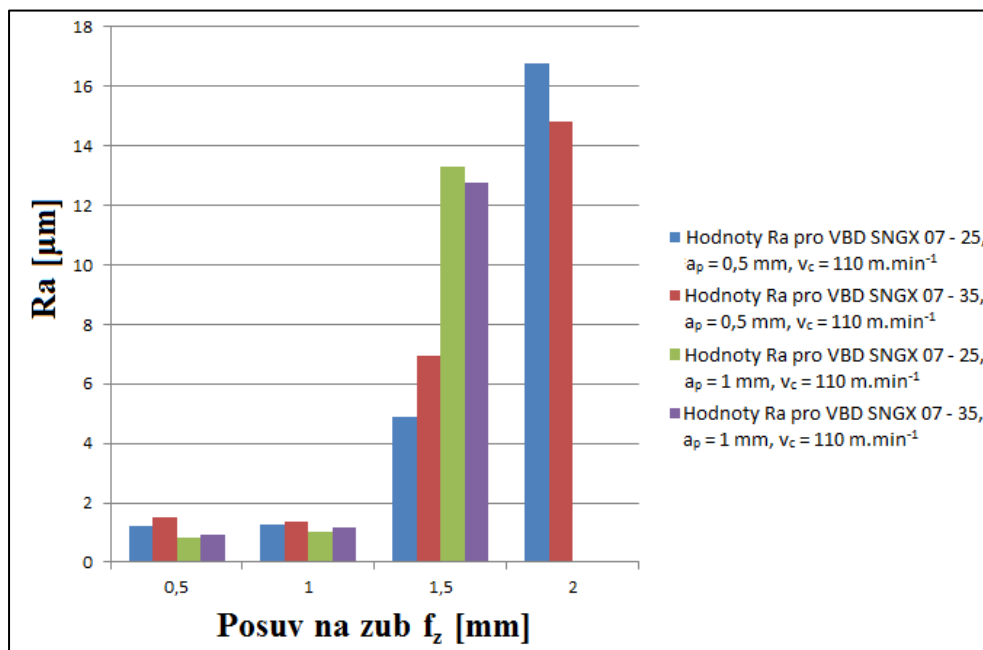
$f_z [\text{mm}]$	$R_a \pm U_C [\mu\text{m}]$	$R_z \pm U_C [\mu\text{m}]$
0,5	$0,951 \pm 0,149$	$5,585 \pm 0,77$
1	$1,19 \pm 0,096$	$6,672 \pm 1,75$
1,5	$12,757 \pm 0,989$	$60,589 \pm 4,691$



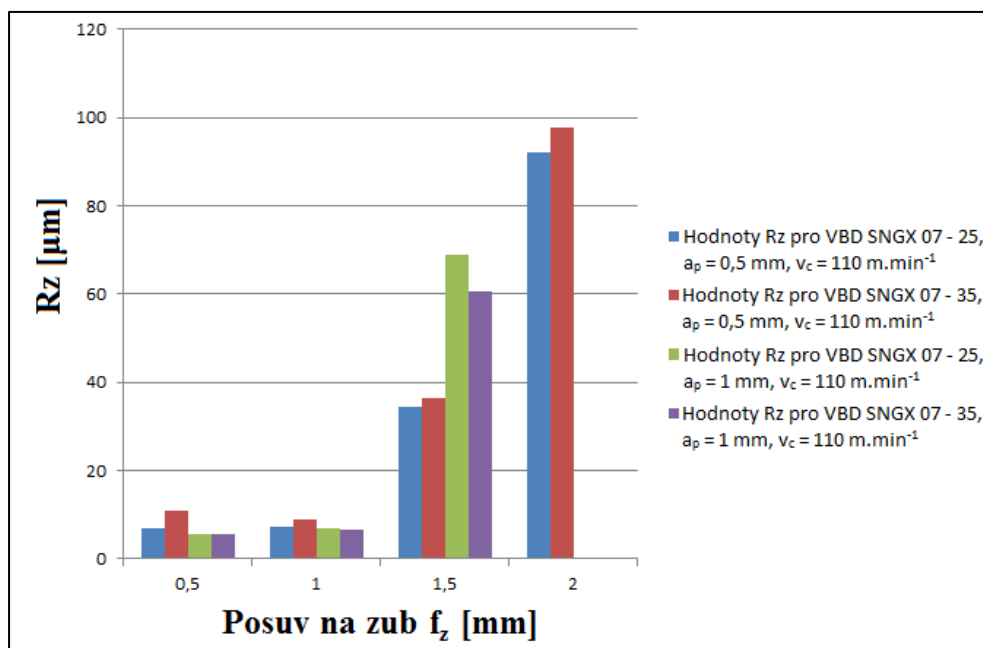
Graf 9 Závislost parametru drsnosti povrchu a jejich rozšířené nejistoty měření pro VBD SNGX 07 -35 v závislosti na posuvu na zub, při konstantní hloubce řezu  $a_p = 1 \text{ mm}$  a řezné rychlosti  $v_c = 110 \text{ m.min}^{-1}$

#### 4.2.8 Porovnání parametru Ra a Rz pro VBD SNGX 07 – 25 a SNGX 07 – 35

Pro porovnání parametru drsnosti povrchu Ra a Rz byly použity hodnoty, které nejsou rozšířené o nejistotu měření. Z Obr. 26 a 27 lze vyčíst, že parametry Ra a Rz jsou nejmenší při použití malého posuvu na zub a vyšší hloubky řezu. Také lze říci, že při vyšším posuvu na zub a vyšší hloubce řezu se parametry drsnosti povrchu mnohonásobně zvýší.



Obr. 26 Graf porovnání parametru drsnosti povrchu Ra



Obr. 27 Graf porovnání parametru drsnosti povrchu Rz

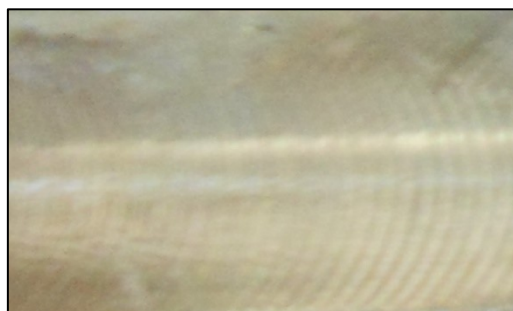
#### 4.2.9 Zhodnocení výsledku drsnosti povrchu

V experimentální části byly vyhodnoceny parametry drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$  a porovnány mezi sebou v závislosti na posuvu na zub, hloubce řezu a zaoblení řezné hrany břitové destičky.

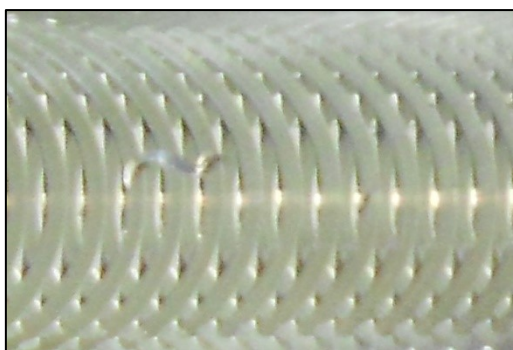
Nejmenší drsnosti povrchu se dosáhlo u VBD SNGX 07 – 25 pro posuv na zub  $f_z = 0,5$  [mm], hloubku řezu  $a_p = 1$  [mm], řeznou rychlost  $v_c = 110$  [m.min<sup>-1</sup>], otáčky  $n = 1393$  [min<sup>-1</sup>] a rychlost posuvu  $v_f = 697$  [mm.min<sup>-1</sup>].

Největší drsnost povrchu se dosáhlo u VBD SNGX 07 – 25 pro posuv na zub  $f_z = 2$  [mm], hloubku řezu  $a_p = 2$  [mm], řeznou rychlost  $v_c = 110$  [m.min<sup>-1</sup>], otáčky  $n = 1393$  [min<sup>-1</sup>] a rychlost posuvu  $v_f = 2786$  [mm.min<sup>-1</sup>].

U vyhodnocení drsnosti povrchu experiment dokázal, že čím menší je posuv na zub a vyšší hloubka řezu, tak parametry drsnosti povrchu klesají. Také lze tvrdit, že když se použije vyšší posuv na zub a vyšší hloubka řezu, tak hodnoty drsnosti povrchu vzrůstají.



*Obr. 28 Detail nejlépe obrobené plochy*



*Obr. 29 Detail nejhůře obrobené plochy*

Tabulka 23 Zhodnocené parametry drsnosti povrchu

Nejmenší naměřená drsnost povrchu	
SNGX 07 - 25	
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]
0,843	5,762
Největší naměřená drsnost povrchu	
SNGX 07 - 25	
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]
16,745	92,265

#### 4.3 Diskuze a doporučení

V bakalářské práci byly vyhodnoceny naměřené hodnoty řezných sil a parametry drsnosti povrchu v závislosti na změně posuvu na zub, hloubce řezu a zaoblení řezné hrany břitové destičky. Výsledné hodnoty byly zpracovány do grafů, tabulek a porovnány mezi sebou.

Diskuze experimentální části je věnována porovnání výsledných hodnot bakalářské práce se zpracovanými řešeršemi, které najdeme v první kapitole. V poslední části diskuze bylo vyhodnoceno a doporučeno, kterou VBD bude lepší použít pro vysokoposuvové frézování austenitické oceli za předem daných řezných podmínek.

Ze zpracovaných řešerší je zřejmé (a také z teorie), že na řezné síly a drsnost povrchu má zásadní vliv zvyšování řezných parametrů. Zjistilo se, že při zvyšování řezné rychlosti, klesají hodnoty řezných sil a drsnosti povrchu. Zvyšováním posuvu na zub a zvýšení hloubky řezu rostou řezné síly a drsnosti povrchu. V bakalářské práci se zjistilo, že čím větší posuv na zub a hloubka řezu se použije, tím větší budou hodnoty řezných sil a parametrů drsnosti povrchu. Po porovnání lze tvrdit, že pro frézování austenitické oceli z hlediska nízkých řezných sil a kvalitnější drsnosti povrchu, je lepší použít nízký posuv na zub s malou hloubkou řezu.

Z hlediska břitových destiček použitých v experimentální části. Je lepší zvolit destičku s menším zaoblením řezné hrany. Menší zaoblení řezné hrany má nižší řezné síly a lepší drsnost povrchu, jak vyplývá z vyhodnocených dat experimentální části.

Z hlediska vyměnitelných břitových destiček a řezných parametrů bych doporučil SNGX 07 – 25 pro řezné parametry viz Tabulka 24. Řezné parametry a VBD doporučuji, protože při těchto parametrech byly nízké řezné síly a nízká drsnost povrchu.

*Tabulka 24 Doporučené řezné parametry, VBD a výsledné složky řezných sil a výsledné parametry drsnosti povrchu*

SNGX 07 - 25				
Řezná rychlost $v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	Otáčky $n$ [min <sup>-1</sup> ]	Posuv za zub $f_z$ [mm]	Rychlost posuvu $v_f$ [mm.min <sup>-1</sup> ]	Hloubka řezu $a_p$ [mm]
110	1393	0,5	697	0,5
Výsledné složky řezné síly				
$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	$F$ [N]	
83,9	123,2	133,6	200,1	
Výsledné parametry drsnosti povrchu				
$R_a$ [μm]		$R_z$ [μm]		
1,217		6,924		



## **Závěr**

Cílem bakalářské práce bylo vyhodnocení složek řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ , a výsledné síly  $F$  a parametrů drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$ , pro čelní vysokoposuvové frézování austenitické oceli 1.4404 (X2CrNiMo17–12-2) dle ČSN 17349.4. Polotovár se obráběl na stroji DMG MORI DMU 50. Nástrojem byla frézovací hlavička osazená jednou VBD. Používaly se VBD SNGX 07 -25 a SNGX 07 – 35. Experiment byl zaměřený na vyhodnocení a porovnání řezných sil a drsnosti povrchu pro VBD za předem daných řezných podmínek.

Podle vyhodnocení složek řezných sil a výsledné řezné síly. Má hlavní vliv na řezné síly posuv na zub a hloubka řezu za předem stanovených řezných podmínek. Nebyla měněna řezná rychlost, otáčky ani šířka záběru. Měnil se pouze posuv na zub, rychlost posuvu a hloubka řezu. Za použití těchto řezných parametrů se došlo k závěru, že zvětšováním posuvu na zub a hloubky řezu rostou složky řezných sil.

Podle vyhodnocení parametrů drsnosti povrchu, má velký vliv na drsnost povrchu posuv na zub a hloubka řezu. Bylo zjištěno, že malý posuv na zub a větší hloubka řezu způsobuje lepší drsnost povrchu a velký posuv na zub a velká hloubka řezu vytváří vysokou drsnost povrchu.

## Použitá literatura

- [1] Hlavní skupiny korozevzdorných ocelí. *Terapol* [online]. Chomutov: TERAPOL spol. s r.o., 2002 [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <http://www.terapol.cz/clanek/no-vap-hlavni-skupiny>.
- [2] MOHYLA, Miroslav. *Nekonvenční strojírenské materiály I*. 2. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1999. ISBN 80-7078-969-7.
- [3] Austenitické a superaustenitické korozevzdorné oceli – M1.0-2.0. *SANDVIK Coromat* [online]. SANDVIK CZ s.r.o [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece\\_materials/iso\\_m\\_stainless\\_steel/pages/austenitic-and-super-austenitic-stainless-steel-%E2%80%93-m1.0-2.0.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_m_stainless_steel/pages/austenitic-and-super-austenitic-stainless-steel-%E2%80%93-m1.0-2.0.aspx).
- [4] Obrobitelnost nerezových ocelí. *Konstrukce* [online]. KONSTRUKCE Media, s.r.o [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/obrobitelnost-nerezovych-oceli/>.
- [5] Moderní obrábění nerezových ocelí. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <http://m.mmspektrum.com/clanek/moderni-obrabeni-nerezovych-oceli>.
- [6] Teorie Obrábění: Opatření břitů nástroje. *Učíme v prostoru* [online]. [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: [http://uvp3d.cz/drtic/?page\\_id=2835](http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2835).
- [7] Příručka pro technology: Proces obrábění v nerezových ocelích - závěrečné tipy. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-proces-obrabeni-v-nerezovych-ocelich-zaverecne-tipy.html>.
- [8] Frézování korozevzdorných ocelí. *SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting\\_started/milling\\_different\\_materials/stainless\\_steel\\_milling/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/milling_different_materials/stainless_steel_milling/pages/default.aspx).
- [9] Informace o třídách: Austenitické/feritické/martenzitické korozevzdorné oceli. *SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/grade\\_information/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/grade_information/pages/default.aspx).

- [10] Sandvik Coromant COROMILL. *Amazon Try prime* [online]. [cit. 2017-01-24]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/Sandvik-Coromant-COROMILL-Carbide-Milling/dp/B007JX8TTA>.
- [11] PÍŠKA, M., *Dnešní vývojové trendy v obrábění a jejich důsledky*. Brno, 2009.
- [12] BRYCHTA, Josef. *Progresivní metody v obrábění: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2513-7.
- [13] Akademie CNC obrábění. *Technický týdeník* [online]. Brno: Ing. Aleš Polzer, Ph.D., 2009 [cit. 2017-01-24]. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc-obrabeni/akademie-cnc-obrabeni-13\\_8548.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc-obrabeni/akademie-cnc-obrabeni-13_8548.html).
- [14] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2017-01-24]. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [15] Product Catalog: Sensors and Solutions for Cutting Force Measurement. *Kistler* [online]. Eulachstrasse, 22 8408 Winterthur, Switzerland: Kistler Group, 2017 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=62&model=download&callee=frontend>.
- [16] Nástroje pro vysokorychlostní a vysokoposuvové frézování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006 [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/nastroje-pro-vysokorychlostni-a-vysokoposuvove-frezovani.html>.
- [17] Technologie povlakování. *Ceme Con* [online]. Ivančice: CemeCon [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://www.cemecon.cz/technologie/>.
- [18] Nástroje pro třískové obrábění. *Sst3* [online]. [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://www.sst3.estranky.cz/clanky/rezne-materialy.html>.
- [19] Nové možnosti frézovacích nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. MM, 2016 [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/nove-moznosti-frezovacich-nastroju.html>.
- [20] Frézování vysokými posuvy. *MM Průmyslové spektrum* [online]. MM, 2008 [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-vysokymi-posuvy-2.html>.

- [21] Příručka pro technology: Jak dosáhnout vysoké produktivity při frézování? *MM Průmyslové spectrum* [online]. MM, 2013 [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/cz/clanek-118/prirucka-pro-technology-jak-dosahnout-vysoke-produktivity-pri-frezovani.html>.
- [22] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2017-01-27]. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [23] Vliv vybraných parametrů procesu na řezné síly při HSC. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. MM: Ing. Tomáš Skopeček, Ph. D. student, 2002 [cit. 2017-01-27]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-vybranych-parametru-procesu-na-rezne-sily-pri-hsc.html>.
- [24] Vliv legovacích prvků na vlastnosti ocelí. *Svanda.webz* [online]. [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <http://svanda.webz.cz/vyuka/legury.htm>.
- [25] Nerezová ocel 1.4404. *Inox* [online]. INOX, 2016 [cit. 2017-01-31]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14404.html>.
- [26] MIKEL, Pavel. *Predikce sil a kvality opracování při frézování s vysokými posuvy*. Brno 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 59s. příloh5. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, Csc.
- [27] GAZDA, M. *Vysokoposuvové frézování ocelí: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014, 71 s. Vedoucí práce: Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
- [28] KOUŘIL, Petr. *Efektivní frézování korozivzdorných ocelí oktagonální VBD*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 70 s. 5 příloh. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
- [29] Frézování rovinných ploch: Frézování rovinných ploch válcovými čelními frézami. *ZOZEI* [online]. Brno, 2016 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://zozei.sssebrno.cz/frezovani-rovinnych-ploch/>.

- [30] MUÑOZ-ESCALONA, P., A. SHOKRANI a S.T. NEWMAN. Influence of cutting environments on surface integrity and power consumption of austenitic stainless steel. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2015, **36**, 60-69 [cit. 2017-03-08]. DOI: 10.1016/j.rcim.2014.12.013. ISSN 07365845. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584515000113>.
- [31] LIU, Han Lian, Qing Ge ZHANG, Chuan Zhen HUANG, Bin ZOU a Hong Tao ZHU. Experimental Study on Face Milling Austenitic Stainless Steel. *Materials Science Forum* [online]. 2012, **723**, 35-40 [cit. 2017-03-08]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.723.35. ISSN 1662-9752. Dostupné z: <http://www.scientific.net/MSF.723.35>.
- [32] MAUROTTO, A., D. TSIVOULAS a M.G. BURKE. Surface Integrity in Dry Milling of 304L Steel: A Parametric Study. *Procedia CIRP* [online]. 2014, **13**, 156-162 [cit. 2017-03-08]. DOI: 10.1016/j.procir.2014.04.027. ISSN 22128271. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827114000286>
- [33] POLISHETTY, Ashwin, Mohanad Fakhri Abdulqader ALABDULLAH, Nihal PILLAY a Guy LITTLEFAIR. A Preliminary Study on Machinability of Super Austenitic Stainless Steel. In: *Volume 2A: Advanced Manufacturing* [online]. ASME, 2015, V02AT02A037- [cit. 2017-03-08]. DOI: 10.1115/IMECE2015-50224. ISBN 978-0-7918-5735-9. Dostupné z: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/IMECE2015-50224>.
- [34] SHEN, Yang, Yongjie CHEN, Li ZHANG, et al. Effect of radial depth on vibration and surface roughness during face milling of austenitic stainless steel. *Transactions of Tianjin University* [online]. 2011, **17**(5), 336-339 [cit. 2017-03-08]. DOI: 10.1007/s12209-011-1604-6. ISSN 1006-4982. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12209-011-1604-6>.
- [35] DMU 50/70 series: CNC universal milling machines [online]. In: . Sulzerallee, Švýcarsko: DMG MORI Europe AG, s. 20 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://en.dmgmori.com/blob/123874/dde0f533146bc1c6047edc7f022b26ac/pm0uk15-dmu-50-70-pdf-data.pdf>.
- [36] Drsnoměry SurfTest SJ-210. *Mitutoyo* [online]. Teplice: Mitutoyo, 2017 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: [http://dl.mitutoyo.eu/HE/eBook/cz\\_cz/index.html?page=517](http://dl.mitutoyo.eu/HE/eBook/cz_cz/index.html?page=517)

[37] ZLÁMAL, Tomáš. *Příspěvek k obrábění Ni superslitiny a hodnocení řezivosti vybraných řezných materiálů*. Ostrava, 2015. 108 s. Disertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Školitel: doc. Ing. Robert ČEP, Ph.D.

[38] TECHNOLOGIE I: ZÁKLADNÍ METODY OBRÁBĚNÍ – 1. část. *Fakulta strojního inženýrství: ústav strojírenské metrologie* [online]. Brno: Doc. Ing. Anton Humár, CSc., 2004 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/zakl\\_met\\_obr/zakl\\_met\\_obr\\_1.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/zakl_met_obr/zakl_met_obr_1.pdf).

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat své vedoucí bakalářské práce doc. Ing. et Ing. Mgr. Janě Petřů, Ph.D. za pomoc, rady, připomínky, ochotu a strávený čas, který věnovala při vedení mé bakalářské práce.